

Bakır Matrisli Kompozit Fren Balatalarının Üretim Koşulları ve Bileşiminin, Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Olan Etkisinin İncelenmesi

İrem Yılmaz

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart 2022

Investigation of the Effect of Production Conditions and Composition of Copper Matrix
Composite Brake Pads on the Microstructure and Mechanical Properties

İrem Yılmaz

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Metallurgical and Materials Engineering

March 2022

Bakır Matrisli Kompozit Fren Balatalarının Üretim Koşulları ve Bileşiminin, Mikroyapı ve
Mekanik Özelliklere Olan Etkisinin İncelenmesi

İrem Yılmaz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Bilimi Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Hakan Gaşan

Mart 2022

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım klavuzuna göre, Prof. Dr. Hakan Gaşan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bakır Matrisli Kompozit Fren Balatalarının Üretim Koşulları ve Bileşiminin, Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Olan Etkisinin Belirlenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 08/03/2022

İrem Yılmaz

ÖZET

Yüksek hızlı trenler diğer araçlarla kıyaslandığında, yüksek yolcu ve yük kapasitesine, yüksek çalışma hızına, düşük işletme maliyetine ve yüksek güvenlik katsayısına sahiptir. Hızla gelişmekte ve büyümekte olan bu ulaşım türüne tüm dünyada yoğun ilgi duyulmaktadır. Özellikle son yıllarda ülkemizde hızlı tren kullanımının artması, bu taşıtlarda kullanılan fren sistemlerinin tedarikine olan ihtiyacı da artırmıştır. Fren sistemlerindeki en önemli bileşenlerden biri balatalardır ve halihazırda bu sistemlerin tedariki sadece birkaç yabancı firma tarafından sağlanmaktadır. Bu nedenle yüksek hızlı trenlerde kullanılan balataların üretim maliyetlerinin düşürülerek yerli ve milli tedarikinin sağlanması son derece önemlidir.

Bu çalışmada, farklı miktarlarda aşındırıcı malzemenin bakır matrisli kompozit balatanın yapısal, tribolojik ve mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiş ve optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Üretim parametrelerinin belirlenmesi için aşındırıcı malzeme olarak ağırlıkça %5 SiC içeren numuneler hazırlanmış olup farklı sıcaklık (850-900-950°C) ve sürelerde (0,5-1-1,5 saat) sinterlenmiştir. En yüksek kesme ve basma mukavemeti ve en düşük porozite miktarı 950°C-1,5 saat sinterleme parametrelerinde elde edilmiştir.

Optimum üretim parametrelerinin belirlenmesinden sonraki aşamada aşındırıcı malzeme olarak ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10 oranında SiC kullanılarak balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen balata numunelerinin sürtünme katsayısı, aşınma miktarı, kesme dayanımı ve aşınma testi öncesi ve sonrası yüzeylerin morfolojik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Standartlara uygun ve stabil sürtünme katsayısı %10 SiC içeren numunede gözlemlenmiştir. Artan aşındırıcı miktarının sürtünme esnasında sürtünme filminin oluşumuna sebep olduğu ve sürtünme katsayısının stabilizasyonunu sağladığı ve hacim kaybını azalttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bakır matrisli kompozit, yüksek hızlı tren, balata

SUMMARY

High speed trains have high passenger and freight capacity, high operating speed, low operating cost and high safety coefficient when compared to other vehicles types. There is a big interest in this type of transportation, which is developing and growing rapidly all over the world. Especially in recent years, the increase in the use of high-speed trains in our country has increased the need for the supply of brake systems used in these vehicles. One of the most important components in brake systems is the brake pads and the supply of these systems is currently provided by only a few foreign companies. For this reason, it is extremely important to reduce the production costs of the brake pads used in high-speed trains and to provide their local and national supply.

In this study, the effect of different amounts of abrasive material on the structural, tribological and mechanical properties of copper matrix composite brake pad was investigated and optimum production parameters were determined. In order to determine the production parameters, samples containing 5% by weight SiC as abrasive material were prepared and sintered at different temperatures (850-900-950°C) and times (0,5-1-1,5 hours). The highest shear and compression strength and the lowest porosity were obtained at 950°C-1,5 hours sintering parameters.

After determining the optimum production parameters, pad samples were produced by using 2, 4, 6, 8 and 10 wt% SiC as abrasive material. The friction coefficient, wear amount, shear strength and morphological and chemical properties of the surfaces before and after the abrasion test of the produced brake pad samples were determined. A stable friction coefficient conforming to the standards was observed in the sample containing 10% SiC. It has been concluded that the increased amount of abrasive causes the formation of a friction film during friction, stabilizing the friction coefficient and reducing the volume loss.

Keywords: Copper matrix composite, high speed train, brake pad

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Kompozit Malzemeler.....	3
2.1.1. Polimer matrisli kompozitler	3
2.1.2. Seramik matrisli kompozitler	4
2.1.3. Metal matrisli kompozitler	5
2.2. Trenler İçin Mekanik Fren Sistemleri	6
2.2.1. Kampanalı frenler	6
2.2.2. Disk frenler	7
2.3. Balatalar	7
2.3.1. Organik esaslı balatalar	8
2.3.2. Karbon esaslı balatalar.....	9
2.3.3. Metalik esaslı fren balataları.....	9
2.4. Metalik Esaslı Balatalarda Kullanılan Malzemelerin Sınıflandırılması	11
2.4.1. Matris malzemesi.....	11
2.4.2. Katı yağlayıcılar	12
2.4.3. Aşındırıcılar	12
2.4.4. Takviye malzemeleri	13

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.5. Metalik Esaslı Balataların Üretimi.....	14
2.6. Balatalarda Tribolojik Sistem	16
2.6.1. Aşınma mekanizmaları	20
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM	25
4.1. Optimum Sinterleme Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Numunelerin Üretimi ve Numunelerin Karakterizasyonu.....	25
4.2. Farklı Miktarlarda Aşındırıcı Oranlarına Sahip Numunelerin Üretimi ve Karakterizasyonu	29
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	34
5.1. Optimum Sinterleme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	34
5.1.1. Porozite hesaplamaları.....	34
5.1.2. Basma ve kesme deneyleri	35
5.2. Farklı Miktarlarda Aşındırıcı Oranına Sahip Numunelerin Karakterizasyonu ...	37
5.2.1. Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları	38
5.2.2. Mekanik karakterizasyon çalışmaları	48
5.2.3. Tribolojik karakterizasyon çalışmaları	50
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Fren balatalarının sahip olduğu farklı katmanların şematik görüntüsü (Rajaei vd., 2020).....	10
2.2. Metalik matris içerisine katılan farklı şekildeki takviye elemanları (Bucur, 2015).	14
2.3. Sinterleme esnasında malzemelerin mikroyapısında meydana gelen değişim (Yavaş, 2014).....	15
2.4. Fren diski ve balata arasındaki temas arayüzünün şematik gösterimi (Akagündüz, 2014).....	16
2.5. Sürtünme filmine ait SEM görüntüsü (Xiao vd., 2016).	18
2.6. Farklı frenleme basınçlarında malzemelerin mikroyapı değişimleri (Bao vd., 2012)..	19
2.7. 4 temel aşınma mekanizması (Kato ve Adachi, 2001).	20
4.1. Turbula mikser.....	26
4.2. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan mekanik pres.....	26
4.3. Sinterlemede kullanılan ısıtma fırını.....	27
4.4. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen balata numuneleri.....	27
4.5. Kesme deneyi aparatının şematik görüntüsü.	28
4.6. Struers Tegra Pol-21 zımparalama ve parlatma cihazı.	30
4.7. Nikon marka Eclipse L150 model optik mikroskop.....	30
4.8. Aşınma deneylerinde kullanılan cihazın şematik görünümü.....	31
4.9. Mitutoyo marka SJ-400 model yüzey profilometresi.	32
4.10. Tescan marka Vega model taramalı elektron mikroskobu.	32
5.1. Numunelerin gerilim-şekil değişimi grafikleri, a) 850°C–0,5-1-1,5 saat, b) 900°C–0,5-1-1,5 saat, c) 950°C–0,5-1-1,5 saat.....	35
5.2. Numunelerin basma mukavemetlerinin karşılaştırmalı grafiği.	36
5.3. Toz numuneye ait XRD diyagramı.....	38
5.4. %2 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.	39
5.5. %4 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6. %6 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.	41
5.7. % 8 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.....	42
5.8. %10 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.....	43
5.9. %2 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.	44
5.10. %4 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.	44
5.11. %6 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.	45
5.12. %8 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.	45
5.13. %10 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.	46
5.14. %10 SiC içeren numuneye ait EDS analizlerinin alındığı noktaları gösteren SEM görüntüsü.....	46
5.15. Sinterleme sonrası numunelerde elde edilen bileşenler.....	48
5.16. Numunelerin basma deneyleri sonucunda elde edilen mukavemet grafikleri, a) gerilme-şekil değişimi grafiği, b) basma mukavemetlerinin karşılaştırılması.	49
5.17. Numunelerin sürtünme katsayısı-alınan yol grafikleri, a) %2 SiC, b) %4 SiC, c) %6 SiC, d) %8 SiC, e) %10 SiC.....	51
5.18. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları.....	52
5.19. Aşınma testi sonrasında numunelerde meydana gelen hacim kaybı.	53
5.20. %2 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.	54
5.21. %4 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.	55
5.22. %6 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.	56
5.23. %8 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.	57
5.24. %10 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.	58
5.25. Aşınma deneyleri esnasında balatalarda meydana gelen tribolojik yapılar.....	59
5.26. EDS analizlerinin alındığı noktaları gösteren SEM görüntüsü.	59
5.27. Aşınmış yüzeye ait XRD diyagramı.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan polimerlerin sınıflandırılması (Gowda vd., 2018).....	4
2.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri (Chawla, 2004).	5
2.3. Sürtünme malzemelerinde kullanılan bakırın tipik özellikleri (Yajnapal ve Bhuvaneswari, 2010).....	11
2.4. Aşındırıcı olarak kullanılan silisyum karbürü ait tipik özellikler.	13
4.1. Üretim parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan bileşim.	25
4.2. Sinterleme işleminde kullanılan işlem parametreleri.	27
4.3. Farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip numunelerin kimyasal bileşimi.	29
5.1. Numunelerin teorik yoğunluk, görünür yoğunluk ve yüzde porozite miktarları.....	34
5.2. Numunelerin iç kesme mukavemetleri.	36
5.3. EDS analizlerinin alındığı noktalardaki kimyasal bileşimler.	47
5.4. Numunelerin iç kesme mukavemetleri.	49
5.5. Aşınma testi sonrasında numunelerin fiziksel özelliklerindeki değişim.	52
5.6. Seçilen noktalardaki kimyasal bileşimler.	60
5.7. Fren diski üzerindeki aşınma izlerinin yüzey profilleri.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C

Açıklama

Santigrat derece

Kısaltmalar

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

EDS

Enerji Dağılım Spektrometresi

XRD

X Işınları Difraksiyonu

MPa

Megapaskal

MJ

Megajoule

Ra

Aritmetik Ortalama Sapma

Rz

5 Tane En Yüksek 5 Tane En Alçak Noktanın Ortalaması

Rq

Aritmetik Ortalama Sapmaların Karekökü

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yüksek hızlı trenler, geleneksel demiryolu taşıtlarıyla kıyaslandığında yolculara hızlı, konforlu, güvenli, ekonomik ve çevre dostu bir yolculuk sunabildiği için oldukça popülerdir. Dünya çapında bakıldığında Japonya, Almanya, Amerika Birleşik Devletleri, Çin, İspanya, İtalya, Türkiye gibi birçok ülke artan seyahat gereksinimlerini karşılamak ve şehirleri birbirine bağlamak için yüksek hızlı demiryolu altyapısı inşa etmiştir ve mevcut altyapıları geliştirmeye devam etmektedir. Bu ülkeler arasında Çin, Dünya'daki en uzun yüksek hızlı demiryolu ağına sahiptir. Yüksek hızlı demiryolu ağlarının sürekli büyüyen gelişim göstermesine paralel olarak bu demiryolu ağlarında kullanılan trenlerin hızları da gün geçtikçe artmaktadır. İlk üretilen yüksek hızlı trenler saatte 200 km kadar yol katedebilirken günümüzde kullanılan hızlı trenlerde bu hız saatte 400 km ve daha da üzerine ulaşabilmektedir.

Yüksek hızlı trenlerde yaşanan bu teknolojik gelişmelerle birlikte artan çalışma hızları bu trenlerde kullanılan fren sistemlerinin de yolcu güvenliği açısından geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Trenlerin hızları arttıkça fren sistemlerinin absorblaması gereken kinetik enerji miktarı artmaktadır. Bu nedenle daha iyi termal iletkenliğe ve kararlılığa sahip yüksek aşınma dirençli fren sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Fren sistemlerini oluşturan 2 temel bileşen bulunmaktadır. Bunlar; fren diski ve balatalardır. Fren diskleri genellikle yüksek termal iletkenlik ve yüksek titreşim sönümleme kapasitesi ile karakterize edildiğinden gri dökme demirden veya çelik malzemeden üretilmektedir. Yüksek hızlı trenlerde kullanılan balatalar da ise yüksek termal iletkenlik, yüksek aşınma direnci ve yüksek termal kararlılık özellikleri ön plana çıktığından bu özellikleri sağlamak için genellikle metal matrisli kompozit balatalar kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozit balataların yapısı oldukça karmaşıktır. Öyle ki hızlı trenlerde kullanılan balatalardan istenilen özellikleri tek bir malzemeden elde etmek mümkün değildir. Bu balatalar en az 5 bileşenden oluşmakla birlikte kullanılan her bir bileşimin yüzdesindeki 1'lik farkı bile balatanın özelliklerini büyük ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle bu

balatalarda kullanılan bileşenlerin, mevcut bileşenlerin yüzdesel oranlarının, üretiminin ve karakterizasyonunun büyük bir titizlikle yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın konusu, yüksek hızlı tren balatalarında kullanılan aşındırıcı malzeme oranlarının balatanın mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin belirlenmesi ve üretim parametrelerinin optimizasyonudur. Çalışmanın amacı ise yüksek termal iletkenlik, düşük termal genleşme, yüksek aşınma direnci ve standartlara uygun kararlı bir sürtünme katsayısına sahip bakır matrisli kompozit sürtünme elemanı üretmektir.

Çalışmanın ilk bölümü genel bir giriş mahiyetinde olup ikinci bölümde tezin konusuyla ilişkili genel bilgiler ilgili başlıklar altında sunulmuştur. Üçüncü bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan materyal ve yöntem verilmiş olup dördüncü bölümde deneysel bulgular verilmiştir. Beşinci bölümde tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir. Tezin sonunda ise çalışma sürecinde faydalanılan kaynaklar yer almaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemelerdir (Mortazavian, 2015). Polimer, metal veya seramik gibi malzemelerin oluşturacağı bir matrise ilave edilen takviye malzemeleri (fiberler, partiküller, dolgu malzemeleri vb.) kompozitleri oluşturan temel bileşenlerdendir. Kompoziti oluşturan her malzeme kendine ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini korumaktadır. Matris malzemesinin temel görevi, kompozit malzemeye mukavemet sağlamak ve takviye malzemelerinin dağılmadan birarada kalmasını sağlamaktır. Kompozit içerisine katılan takviye malzemelerinin temel görevi ise, yapıya dayanım ve mukavemet sağlamaktır. Kompozit malzemelerin sahip olduğu hafiflik, sertlik ve mukavemet gibi özellikler kompozitleri geleneksel malzemelere göre bir adım öne çıkarmaktadır (Vairavan, 2005). Kompozit malzemeler, kullanılan matris malzemesine göre polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır (Ravichandran vd., 2015).

2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Termoset ve termoplastik malzemelerin, mekanik özellikleri metallere göre oldukça düşük olduğundan özellikler yapısal uygulamalarda tek başına kullanımı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle yapıya güç ve mukavemet sağlayacak takviye malzemeleriyle beraber kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitler, düşük maliyet, kolay işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik, yüksek yüzey kalitesi ve korozyona karşı gösterdiği üstün direnç özellikleri nedeniyle endüstride büyük ilgi görmektedir. Havacılık, otomotiv, altyapı, biyomedikal ve enerji sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Dong, 2013). Bu sektörlerde kullanılan uygulamaların çoğu için polimerler, istenilen mekanik özellikleri sağlamak için fiberlerle ya da çeşitli dolgu maddeleriyle modifiye edilmektedir. Polimer matrisli kompozitler içerdiği matrisin bağ türüne termoset ve termoplastik polimerler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu polimerlerin ayrıntılı sınıflandırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir (Gowda vd., 2018).

Çizelge 2.1. Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan polimerlerin sınıflandırılması (Gowda vd., 2018).

POLİMERLER	
TERMOPLASTİK	TERMOSET
Naylon	Fenolik
Selüloz asetat	Epoksi
Polistiren	Polyester
Polipropilen	Poliamid
Polietilen	Poliüretan
Polikarbonat	
Polivinil klorür	
Polieter-eter-keton	

Termoplastik polimerler sahip olduğu kimyasal dirençleri, yüksek mekanik özellikleri ve uygun maliyetleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir.

2.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramikler genellikle yüksek ergime noktası, yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve yüksek korozyon direnci gösteren malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu malzemeler yapısı gereği kırılgandır. Ancak içerisine katılan takviye malzemeleriyle seramiklerin bu özellikleri güçlendirilebilmektedir. Seramik matrisli kompozitler, seramik matris fazı içerisine dağılmış takviye fazından oluşan malzemelerdir. Seramik malzeme içerisine katılan takviye malzemeleri seramiğin mekanik özelliklerini, tokluğunu, şok direncini ve kırılganlığını önemli ölçüde iyileştirir. Esas olarak seramik matrisli kompozitler, yüksek sıcaklıklar, aşırı yükleme, aşındırıcı ve koroziv ortamlarda çalışmak için geliştirilmiştir. Havacılık sektöründe gaz türbinlerinde ve arojet motorlarında, enerji sektöründe ısı eşanjörleri ve füzyon reaktör duvarlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Günümüzde çok çeşitli kimyasal kompozisyonlarda seramik matrisli kompozitler kullanılmaktadır. Karbon fiber takviyeli karbon (C/C), silisyum karbür takviyeli silisyum karbür (SiC/SiC), karbon fiber takviyeli silisyum karbür (C/SiC) bunlara örnek olarak verilebilir. Karbon fiber takviyeli silisyum karbür kompozitler, yüksek sıcaklıklardaki

yapısal uygulamalar için en çok tercih edilen seramik matrisli kompozitlerdendir (Zamawiany, 2005).

2.1.3. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, malzemeyi oluşturan bileşenlerden en az birinin metal olduğu iki veya daha çok bileşenden oluşan malzemelerdir. Ağırlıkça en fazla katılan bileşen matris olarak adlandırılırken, diğer bileşenler takviye malzemeleri olarak adlandırılmaktadır. Alüminyum, magnezyum, nikel, titanyum ve bakır matris malzemesi olarak en çok tercih edilen malzemelerdendir. İkinci bileşeni seramik, organik veya farklı türde başka bir metalik malzeme oluşturabilmektedir. Metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri Tablo 2.2’de verilmiştir (Chawla, 2004).

Çizelge 2.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri (Chawla, 2004).

Takviye Malzemeleri					
Geleneksel				Geleneksel Olmayan	
Oksitler	Borürler	Karbürler	Nitrürler	Metalik	Organik
Al ₂ O ₃	AlB ₂	B ₄ C	AlN	Fe	Kül
SiO ₂	TiB ₂	SiC	Si ₃ N ₄	Nb	Yumurta kabuğu
TiO ₂	ZrB ₂	C	TiN	Ta	
ZnO		TaC		Ti	
ZrO ₂		TiC		W	
Fe ₂ O ₃		WC		Metalik camlar	

Metal matrisli kompozitler, monolitik malzemelerle karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemet, sertlik, tokluk ve kırılma direncine sahiptir. Metal matrisli kompozitler ayarlanabilir bileşim ve mekanik özellikleri nedeniyle başta havacılık endüstrisi olmak üzere otomobil, enerji, spor, ambalaj gibi çoğu sektörde kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Katı hal prosesi, sıvı hal prosesi ve biriktirme yöntemi bunlara örnek olarak verilebilir. Katı hal prosesinde kullanılan en yaygın yöntem toz metalurjisi yöntemidir. Bu yöntem geleneksel toz karıştırma, şekillendirme ve sinterleme işlemlerini içermektedir. Sıvı hal prosesinde ise

en yaygın kullanılan yöntem karıştırma dökümdür. Karıştırma döküm yönteminde ergimiş matris içerisine takviye malzemeleri katılarak mekanik karıştırma işlemi uygulanır. Metal matrisli kompozitlerin elde edilmesinde en basit ve uygun maliyetli yöntemlerdendir. Biriktirme prosesinde, ergimiş matris malzemesi takviye malzemeleriyle birlikte bir altlık üzerinde biriktirilir ve altlık üzerinde katılaşır. Bu tekniğin ana avantajı, matris mikroyapısının çok ince tane boyutlarına sahip olması ve düşük segregasyon sergilemesidir. Ancak bu teknik sadece süreksiz takviyelerle kullanılabilmektedir. Bununla birlikte maliyetleri oldukça yüksektir ve kullanımı basit şekillerle sınırlıdır (Haghsenas, 2016).

2.2. Trenler İçin Mekanik Fren Sistemleri

Fren sistemleri, birçok insanın sağlığını ve yaşamını koruduğu için bir taşıtın en kritik parçalarındandır ve hayati öneme sahiptir. Fren sistemlerinin 3 temel işlevi vardır. Bunlar:

- Hareket halindeki bir aracı yavaşlatmak,
- Hareket halindeki bir aracı durdurmak,
- Duran bir aracın hareket etmesini engellemektir.

Frenleme esnasında meydana gelen en önemli olay, fren balatası ile fren diski arasındaki sürtünmedir. Balata diske temas ettiğinde, kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştüren sürtünme meydana gelir. Isı biçimindeki enerji ise açık atmosfere yayılarak bertaraf edilir (Verma, 2016). Trenlerde kullanılan mekanik frenler 2 grupta kategorize edilebilir. Bunlar; kampanalı frenler ve disk frenlerdir (Walia, 2019).

2.2.1. Kampanalı frenler

Kampanalı frenler, yük vagonlarında güncel olarak kullanılmakta olan bir sistem olmakla birlikte yolcu trenlerinde de disk frenler ve elektrodinamik frenlerle birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Kampanalı frenlerde, frenlenen yüzeyler silindriktir ve dönme eksenine dik yönde sıkıştırma kuvveti uygulanmaktadır. Kampanalı frenler ucuz ve hafiftir ve ayrıca takılması, bakımı, değiştirilmesi kolaydır. Tüm bu avantajlarının yanısıra kampanalı frenlerde, frenleme esnasında üretilen ısı tekerlekler ve fren balatası tarafından absorbe edilmekte ve atmosfere konveksiyon ve radyasyonla yayılmaktadır. Dolayısıyla bu

yayılm esnasında tren rayına da ısı iletimi gerçekleşmektedir. Bu durumun ani frenleme esnasında tekerlekte aşırı ısınmaya ve hasara neden olabileceği literatürde belirtilmektedir (Teimourimanesh, 2014).

2.2.2. Disk frenler

Disk frenler, yolcu trenlerinde ve yüksek hızlı trenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Disk frenlerde, frenleme balatalar ve fren diskisi arasındaki sürtünme ile meydana gelmektedir. Frenleme esnasında, fren silindiri hidrolik basıncı fren kaliperlerine gönderir ve kaliperler kapanır. Bu esnada balatalar, disk ile temas ederek frenleme gerçekleştirilir. 160 km/s ve üzerindeki hızlarda çalışan araçlar için mekanik fren sistemi olarak disk frenlerin kullanılmasına öncelik verilmektedir. Disk frenler, fren diskisi ve fren balatası olmak üzere 2 temel bileşenden oluşurlar. Fren diskileri için yaygın kullanılmakta olan malzemeler gri dökme demir, sfero dökme demir ve dökme çeliktir. Balatalarda kullanılan malzemeler ise organik veya sinterlenmiş kompozitlerdir. Disk frenlerin gürültü seviyeleri kampanalı frenlerin gürültü seviyelerinden daha düşüktür. Ancak disk frenler, kampanalı frenlerden daha ağırdır. Kurulumu ve bakımı daha pahalıdır (Gigan, 2015).

2.3. Balatalar

Fren balataları, metaller, seramikler ve polimer olmak üzere 3 ana malzeme türünü içerdiğinden şimdiye kadar üretilmiş en karmaşık yapıya sahip kompozit malzemeler arasındadır. Yüksek aşınma direnci, termal yorgunluğa karşı direnç, termal stabilite, üretim kolaylığı, çalışma esnasında minimum vibrasyon ve farklı ortam koşullarında stabil sürtünme katsayısı balatalardan beklenen özellikler arasındadır. Balatalar, fren diskini çift taraflı sıkıştırarak frenlemeyi ve/veya duruşu sağlayan sürtünme elemanlarıdır. Bu frenleme ve duruş esnasında sürtünme ve buna bağlı olarak balatada aşınma meydana gelmektedir. Bu nedenle balataların belirli periyotlarla değiştirilmeleri gerekmektedir. Motorlu taşıtlarda balata değişiminin ihmal edilmesi frenleme performansının güvenlik sınırları dışına çıkmasına ve çok ciddi kazalara yol açabilmektedir (Ertan ve Yavuz, 2010).

Piyasada mevcut olarak kullanılmakta olan balatalar incelendiğinde farklı şekilde, boyutta ve içerikte olan birçok farklı türü karşımıza çıkmaktadır. Bu çeşitliliğin sebebi,

balataların kullanıldığı taşıtın hızına, yük taşıma kapasitesine, boyutlarına ve frenleme esnasında absorblanmış olduğu enerji miktarına bağlıdır. Örneğin bir otomobil ve yolcu uçağının yük taşıma kapasitesi, hızı ve boyutları aynı olmadığı gibi bu araçlarda kullanılan fren balatalarının da aynı olması beklenemez. Bu nedenle balatalar, kullanılan bileşenlerin kompozisyonuna bağlı olarak organik esaslı, karbon esaslı ve metalik esaslı balatalar olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır (Bijwe, 1997).

2.3.1. Organik esaslı balatalar

Organik esaslı balatalar, otomobil endüstrisinde en çok kullanılan balata türüdür. Genellikle birçok farklı türde (tipik olarak 10-20) tozların sıkıştırılmasıyla elde edilir. Bu balatalarda kullanılan bileşenler, yumuşak ve kolay aşınan fenolik reçinelerden, sert ve aşınmaya dirençli fiberlere ve aşındırıcı partiküllere kadar çok geniş bir aralığı kapsamaktadır. Organik esaslı balatalar asbest içeren ve asbestsiz balatalar olarak kendi içlerinde 2 gruba ayrılabilir. Yakın bir zamana kadar en çok kullanılan balatalar asbest içeren balatalardır. Ancak yapılan çalışmalar asbestin sağlamış olduğu mekanik özelliklerin yanısıra çevreye ve insan sağlığına olan zararlı etkilerini ortaya koymuştur ve bu takviye malzemesinin kullanımı 1989 yılında tamamen yasaklanmıştır (Blau, 2001). Asbestin yasaklanmasıyla birlikte araştırmacılar asbeste alternatif olabilecek özelliklerde birçok malzeme üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Günümüzde organik esaslı balatalarda kullanılan bileşenler ve görevleri aşağıdaki gibidir:

- **Bağlayıcılar:** Diğer bileşenleri bir arada tutarak kararlı bir matris oluştururlar. Organik esaslı balatalarda bağlayıcı olarak genellikle termoset fenolik reçineler kullanılmaktadır. Sönümlenme özelliklerini geliştirmek amacıyla kauçuk ilavesiyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar.
- **Mukavemetlendirici Malzemeler:** Organik esaslı balataların mekanik özelliklerini güçlendirmek ve mukavemet sağlamak amacıyla katılan malzemelerdir. Mukavemetlendirici malzeme olarak genellikle metal fiberler, karbon fiberler, cam elyaf ve kevlar fiberler kullanılmaktadır. Asbest ise yasaklanmadan önce mukavemetlendirici malzeme olarak en çok kullanılan türdür.
- **Dolgu Malzemeleri:** Dolgu malzemeleri, maliyeti azaltmak ve üretilebilirliği arttırmak için organik esaslı balatalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Mika, vermikülit

ve baryum sülfat gibi malzemeler en çok kullanılan dolgu malzemelerine örnek olarak verilebilir.

- Sürtünme Düzenleyiciler: Sürtünme düzenleyiciler, sabit bir sürtünme katsayısı sağlamak ve hem balatanın hem de diskin aşınma özelliklerini kontrol altında tutabilmek için bileşime eklenir. Grafit ve çeşitli metal sülfürler gibi katı yağlayıcılar, yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını stabilize etmek için kullanılır. Alümina ve silika gibi aşındırıcı partiküller ise hem sürtünme katsayısını hem de disk aşınmasını arttırarak yüzeyden demir oksitleri ve istenmeyen maddeleri uzaklaştırırlar (Eriksson ve Jacobson, 2000).

2.3.2. Karbon esaslı balatalar

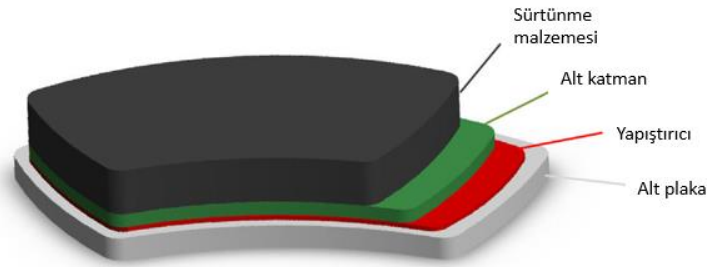
Karbon fiberler, otomotiv, demiryolu, havacılık, rüzgar enerjisi gibi çeşitli endüstrilerde kullanılan kompozitlerde takviye elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Krenkel vd., 2002). Karbon-karbon (C/C) kompozitler, karbon fiber takviye edilmiş karbon matrisinden oluşan kompozit malzemelerdir. C/C fiber fren balataları, süpersonik uçaklarda, ticari jet uçaklarda ve askeri uçaklarda karşılaşılan zorlu koşulları karşılamak üzere geliştirilmiştir. C/C kompozit fren balataları, mükemmel yüksek sıcaklık performansı, yüksek aşınma direnci ve yüksek termal şok direnci özelliklerine sahiptir. Bu balatalarda kullanılan fiberler poliakrilonitril (PAN) ve ziftten üretilmektedir (Bhuvaneswari, 2010).

2.3.3. Metalik esaslı fren balataları

Metal esaslı balatalar, sinterlenmiş balatalar olarakta ifade edilmektedir. Bileşenleri, metal matris, katı yağlayıcı, sürtünme düzenleyici ve aşındırıcı malzeme gruplarını içermektedir. Bileşenlerin, homojen bir şekilde karıştırılarak preslenmesi ve birleşip yoğun bir heterojen katı oluşturma kadar sinterlenmesiyle elde edilirler. Bu malzemeler, olağanüstü termal stabiliteye ve termal kopma direncine sahiptir. İçerdikleri matris türüne göre kendi içlerinde 3 gruba ayrılabilir. Bu gruplar, bakır esaslı, demir esaslı ve bakır-demir esaslı balatalardır (Miller, 1997). Bakır esaslı balatalar, yüksek ısı iletkenliğine ve aşınma direncine sahip olduğu için hızlı trenlerde, uçaklarda ve otomobillerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal matrisli sürtünme malzemelerinin organik esaslı sürtünme

malzemelerine göre iki temel dezavantajı vardır. Bunlar, yaklaşık iki kat daha pahalı ve ağır olmalarıdır (Selamat, 2005).

Metal matrisli balatalar belirli katmanlara sahiptir. Bu katmanların belirli görevleri vardır ve en önemli katman balatanın en üstünde yer alan sürtünme tabakasıdır (Singh, 2015). Sürtünme katmanı, genellikle 6-9 mm arasında değişen bir kalınlığa sahiptir. Sürtünme katmanının bileşimi balatanın kullanılacağı taşıta göre önemli ölçüde değişmektedir. Sürtünme katmanının alt kısmında alt katman olarak adlandırılan yapıştırma tabakası bulunmaktadır. Bu katman 1-4 mm arasında değişen bir kalınlığa sahip olmakla birlikte görevi sürtünme malzemesinin tutunmasını sağlamaktır. Alt katmanın, arka plakanın üzerine tam olarak tutunması için genellikle 1 mm'nin altında bir taban kaplama uygulanmaktadır. Arka plakanın görevi ise sahip olduğu profilli kenarları sayesinde balatanın kaliper kılavuzu boyunca hareket etmesini sağlamaktır (Borawski, 2016). Şekil 2.1'de fren balatalarının sahip olduğu farklı katmanların şematik görüntüsü yer almaktadır (Rajaei vd., 2020).



Şekil 2.1. Fren balatalarının sahip olduğu farklı katmanların şematik görüntüsü (Rajaei vd., 2020).

2.4. Metalik Esaslı Balatalarda Kullanılan Malzemelerin Sınıflandırılması

Metalik esaslı balatalarda kullanılan malzemeler, matris malzemeleri, katı yağlayıcılar, takviye malzemeleri ve aşındırıcı malzemeler olarak 4 grupta sınıflandırılmaktadır.

2.4.1. Matris malzemesi

Matris malzemeleri, sürtünme elemanının ağırlığının genel olarak %50-80'ini, hacminin ise yaklaşık %40'ını oluşturur. Matris malzemeleri, fren balatasına dayanıklılık, termal iletkenlik, sürtünme, aşınma gibi temel fiziksel ve mekanik özelliklerini sağlar. Metal matrisli balatalarda matris malzemesi olarak genellikle bakır, demir ya da ikisinin kombinasyonları kullanılmaktadır. Elektrolitik demir tozları ya da sünger demir tozları, demir bazlı sürtünme elemanlarının imalatında matris olarak kullanılmaktadır. İnce taneli ve homojen dağılım gösteren demir tozlarından üretilen sürtünme elemanları, sinterleme esnasında artan yüzey enerjisiyle birlikte yüksek mekanik dayanıma ve mükemmel sürtünme özelliklerine sahiptir. Bakır matrisli sürtünme elemanlarında matris malzemesi olarak elektrolitik bakır tozu kullanılmaktadır. Bakır matris, balataya yüksek termal iletkenlik ve balatanın içerisine katılan diğer seramik malzemeler için temel mukavemet sağlar. Sürtünme malzemelerinde kullanılan bakırın tipik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (Yajnapal ve Bhuvaneshwari, 2010).

Çizelge 2.3. Sürtünme malzemelerinde kullanılan bakırın tipik özellikleri (Yajnapal ve Bhuvaneshwari, 2010).

Özellik	Değer
Görünür Yoğunluk	8,96 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	1083°C
Kaynama Sıcaklığı	2300°C
Çekme Dayanımı	240 MPa
Sıkıştırılabilirlik	7,5 g/cm ³
Termal İletkenlik (Oda sıcaklığında)	385 W/mK
Özgül Isı Kapasitesi (Oda sıcaklığında)	385 J/kgK

2.4.2. Katı yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar, sürtünme elemanının özelliklerini belirleyen temel bileşenlerdendir. Grafit, PbS, MoS₂ ve antimonit piyasada en çok tercih edilen katı yağlayıcılar arasındadır. Ancak antimonit kanser yapıcı bir madde olduğu için günümüzde kullanımı oldukça kısıtlıdır. Grafit, ucuz ve verimli bir yağlayıcı olduğu için piyasada en çok tercih edilen katı yağlayıcıdır (İncesu vd., 2013). Yağlayıcıların yerine getirmesi temel görevler aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Bonfanti, 2016).

- Balata ve disk sürtünme ara yüzdeyinde kararlı ve yüksek elastik özelliklere sahip tribo film oluşmasını sağlamak,
- Yüksek sıcaklıklarda stabil sürtünme katsayısı sağlamak,
- Disk ve balata arasındaki sürtünmeyi ve buna bağlı olarak aşınmayı azaltmak,
- Frenleme esnasında oluşan gürültüyü azaltmak,
- Sahip olduğu yüksek termal iletkenlik ile sürtünme kaynaklı ısınma sonucunda oluşacak/oluşabilecek yerel ergimeyi önlemektir.

2.4.3. Aşındırıcılar

Aşındırıcı malzemeler, sürtünme elemanının diskle teması esnasında sürtünme katsayısını ve aşınma oranını arttıran bileşenlerdir (Chan ve Stachowiak, 2004). Aşındırıcı malzeme olarak genellikle kuvars (SiO₂), alümina (Al₂O₃), silisyum karbür (SiC), zirkonyum silikat (ZrSiO₄), mullit (Al₆O₁₃Si₂), feldispat (KAlSi₃O₈-NaAlSi₃O₈-CaAl₂Si₂O₈), dolomit (CaMg(CO₃)₂) gibi bileşenler kullanılmaktadır (Kumar ve Kumaran, 2019). Sürtünme elemanlarında aşındırıcı olarak sıklıkla kullanılan silisyum karbüre ait tipik özellikler Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Aşındırıcı olarak kullanılan silisyum karbürü ait tipik özellikler.

Özellik	Değer
Görünür Yoğunluk	3,21 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	1800°C
Sertlik	2600 HV
Çekme Dayanımı	20 GPa
Termal İletkenlik (Oda sıcaklığında)	121 W/mK
Özgül Isı Kapasitesi (Oda sıcaklığında)	670-750 J/kgK

Bileşim içerisine koyulan aşındırıcı miktarı arttıkça sürtünme katsayısı artmaktadır. Bu da yüksek sıcaklıklarda güvenli frenlemeyi sağlamaktadır. Aşındırıcıların bir diğer görevi ise sürtünme esnasında disk yüzeyinin temizlenmesini sağlamaktır. Aşındırıcılar, temel sürtünme alanı olan temas bölgelerini oluştururlar. Temas bölgelerinde sürtünme nedeniyle yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Bu esnada matris ve yağlayıcılar devreye girerek temas alanından ısı enerjisinin uzaklaştırılmasını ve aşırı ısınmanın engellenmesini sağlarlar (Kim vd., 2007). Sürtünme elemanlarında yüksek miktarda aşındırıcı malzeme kullanmanın ise sağladığı bazı dezavantajlar mevcuttur. Bunlar:

- Disk ve sürtünme elemanının özgül aşınma oranını artırması,
- Çalışma esnasında stabil olmayan sürtünme katsayısı,
- Frenleme esnasında oluşan fazla gürültüdür.

Bu nedenle sürtünme elemanlarında kullanılan her bir bileşimin ve oranının çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir.

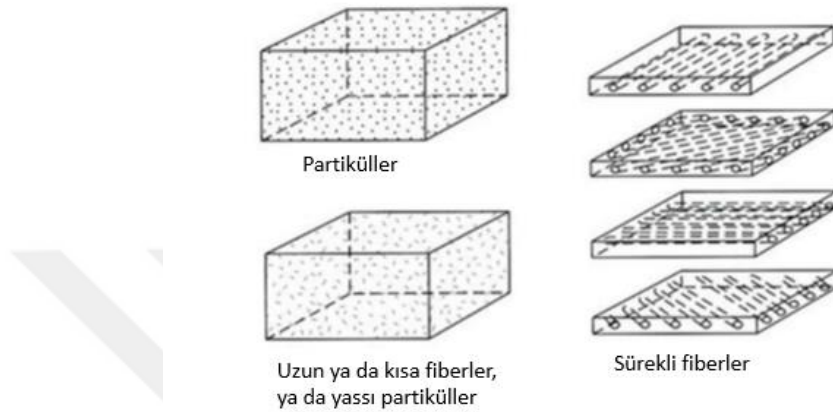
2.4.4. Takviye malzemeleri

Takviye malzemelerinin sürtünme elemanlarına sağlamış olduğu temel özellikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Bonfanti, 2016). Bunlar:

- Sürtünme elemanının aşınmasını minimize etmek,
- Farklı çalışma koşullarında (farklı hız, frenleme basıncı, sıcaklık gibi) sürtünme katsayısını ve aşınma stabilizasyonunu sağlamak,
- Sürtünme elemanının mukavemetini ve kırılma tokluğunu arttırmak,

- Boyutsal stabiliteyi sağlamaktır.

Metalik matrisli sürtünme elemanlarına farklı şekilde ve boyutlarda takviye elemanları katılmaktadır. Şekil 2.2’de farklı şekildeki takviye elemanları verilmiştir (Bucur, 2015).



Şekil 2.2. Metalik matris içerisine katılan farklı şekildeki takviye elemanları (Bucur, 2015).

Balatalar içerisinde en yaygın kullanılan takviye elemanı tipi parçacıklar ve fiberlerdir. Metalik esaslı balatalarda takviye edici olarak en yaygın kullanılan malzeme türü ise sağladığı yüksek mukavemet nedeniyle demir, çelik ve intermetalik bileşenlerdir.

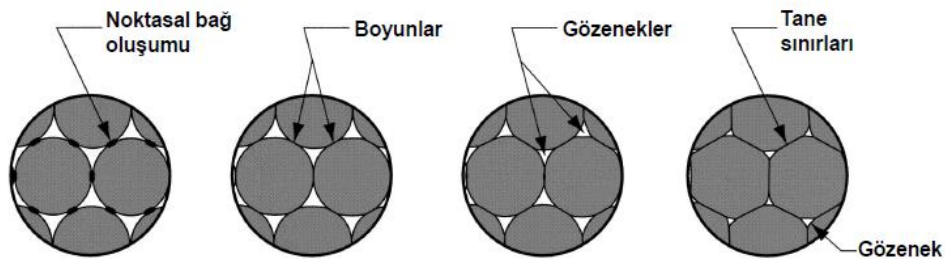
2.5. Metalik Esaslı Balataların Üretimi

Metalik esaslı balataların üretimi karıştırma, şekillendirme ve sinterleme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

Karıştırma işlemi balatayı oluşturan bileşenlerin tüm hacim boyunca homojen bir dağılım göstermesi için yapılmaktadır. Homojen dağılım, nihai parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle karıştırılan malzemenin tipik özelliklerinin, karıştırma cihazının türünün ve proses parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Metalik esaslı balataların karıştırılmasında kuru toz mikserleri kullanılmaktadır. Bu mikserler mekanik yollarla tozların homojen bir şekilde karıştırılmasını sağlamaktadır.

Homojen bir karışımın elde edilmesinden sonraki aşamada balatayı oluşturan tozlar nihai şeklini almak üzere preslenir. Presleme aşamasında, tozlar kalıp içerisine doldurularak belirli basınç altında kompakt hale getirilir. Presleme esnasında tozlar arasındaki gözenek alanı azaltılır ve partiküller arasındaki temas noktalarının sayısı artırılır. Artan basınçla beraber partiküller plastik deformasyona uğrar ve bu da partiküller arasındaki temas alanının artmasına neden olur. Bu işlem için genellikle mekanik, hidrolik ve pnomatik presler kullanılır. İstenilen yoğunluğu elde etmek için genellikle 300-700 MPa aralığındaki basınçlar kullanılmaktadır (Delarbre, 2019).

Numunelerin preslendikten sonra mukavemet ve sertlikleri oldukça düşüktür ve düşük yükler altında kolayca ufalanabilmektedir. Sinterleme, nihai parçanın mekanik özelliklerini ve sertliğini arttırmak için parçanın ergime sıcaklığının altında yapılan partiküllerin birbirine atomik olarak bağlanmasını sağlayan bir ısıtıl işlemidir. Bu işlem genellikle metalin ergime noktasının 0,7 ile 0,9'u arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir (Bocchini, 2004). Sinterleme işlemi, kendi içerisinde ilk, orta ve son aşama olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, toz partiküllerinin yeniden düzenlenmesini ve partiküller arasındaki temas noktalarında güçlü bir bağ veya boyun oluşumu içermektedir. Orta aşamada, partiküller arasında meydana gelen boyunlar büyüme gösterir. Boyunlar büyüdükçe malzemenin içerdiği por miktarı önemli ölçüde azalır ve tane sınırları oluşur. Parçada büzülme gözlemlenir. Bu aşamanın sonunda nispi yoğunluk yaklaşık 0,9'dur. Son aşamada, yoğunlaşma işlemi devam ederken ve aynı zamanda tane büyümesi gözlemlenmektedir böylece tane sınırlarında oluşan porlar elimine edilmektedir. Sinterleme esnasında malzemelerin mikroyapısında meydana gelen değişim Şekil 2.3'te verilmiştir (Yavaş, 2014).

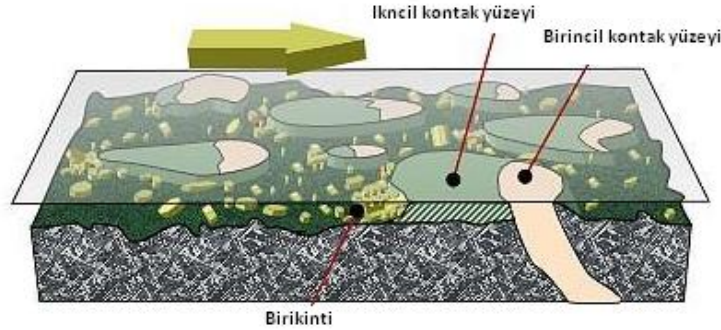


Şekil 2.3. Sinterleme esnasında malzemelerin mikroyapısında meydana gelen değişim (Yavaş, 2014).

2.6. Balatalarda Tribolojik Sistem

Sürtünme, birbiriyle temas halindeki iki katı cismin kayma veya yuvarlanma sırasında harekete gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla sürtünme esnasında birbiri ile kayma, çarpma veya yuvarlanma hareketi yapan iki yüzeyden birinde veya her ikisinde de oluşan yüzey hasarı veya yüzeyden malzeme kopması aşınma olarak tanımlanmaktadır. Hareket yönünün tersindeki teğetsel direnç kuvveti ise sürtünme kuvveti olarak tanımlanmaktadır.

Fren sistemlerinde, meydana gelen frenleme esnasında kinetik enerji sürtünme yardımıyla ısı enerjisine dönüşmektedir. Fren basıncının kaliperlere gelmesiyle birlikte balata ve fren diskinin pürüzlü kısımları temas haline geçer. Fren diski ile balata arasındaki temas arayüzünün şematik gösterimi Şekil 2.4' te verilmiştir (Akagündüz, 2014).



Şekil 2.4. Fren diski ve balata arasındaki temas arayüzünün şematik gösterimi (Akagündüz, 2014).

Balata ve disk arasında sürtünmenin başladığı an sürtünme katsayısının en yüksek olduğu anlardandır. Bunun temel nedeni, balata yüzeyinde temas platolarının oluşumu ve buna bağlı olarak balata ve fren diski arasında gerçek temas alanının artmasıdır. Şekil 2.4' te görüldüğü üzere platolar, birincil platolar ve ikincil platolar olarak ikiye ayrılmaktadır. Yüksek aşınma direncine ve mukavemete sahip birincil platolar genellikle aşındırıcı partiküllerden meydana gelmektedir. Birincil platolar balatanın aşınan yüzeyi üzerinde bir engel oluşturarak ikincil platoların birikmesine ve dolayısıyla oluşumuna neden olurlar (Eriksson ve Jacobson, 2000).

Fren diskinin sertliği balatanın sertliğinden oldukça fazla olduğu için sşrtşnme esnasında diskin pşrşzlş yşzeyleri balataya temas ettiğinde balatada, parça kopmaları ve birikintiler meydana gelmektedir. Oluşan bu kopmalar ve birikintilerin bir kısmı sşrtşnme esnasında arayşzden atılır. Diğerleri deforme olma, ezilme, kırılma, soyulma gibi tekrarlı sşreçlerle sşrtşnme esnasında balata yşzeyine yapışır ve balata yşzeyinde bir yşzey filmi meydana getirirler. Meydana gelen film üçşncş gşvde veya yşzey filmi olarak bilinir ve fren çiftinin sşrtşnme ve aşınma özelliklerinde çok önemli rolş vardır (Godet, 1990).

Sşrtşnme esnasında temas arayşzünde meydana gelen çeşitli fiziksel, kimyasal ve tribolojik sebeplerden dolayı farklı yapılarada sşrtşnme filmi meydana gelebilmektedir. Yüksek hız ve sıcaklıklarda frenleme esnasında balatalar, havadaki oksijenle kolayca reaksiyona girerek sşrtşnme arayşzeyinde oksidasyon filmi oluşturur. Oluşan bu oksidasyon filmi sert ve kırılğandır. Sşrtşnme kuvveti etkisi ile kolayca çatlar ve pul pul dşkşlşr. Bununla birlikte oksidasyon filminin fren diski ile doğrudan temas etmesi balatanın sşrtşnme ve aşınma özellikleri ağısından oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Oksidasyon filminin doğrudan disk ile teması halinde sşrtşnme katsayısında dşşşş ve aşınma direncinde etkin bir artışı gözlemlenmektedir (Bowden ve Tabor, 2001).

Sşrtşnme elemanlarında, sşrtşnme esnasında termal bozunmalar nedeniyle CO, CO₂, CH₄, CH₂ gibi bazı gazlar ağığa çıkmaktadır. Bu gazların sşrtşnme yşzeyi tarafından absorbe edilmesi zor olduğundan arayşzeyde bir gaz filmi oluşturmaktadır. Oluşan gaz filmi, sşrtşnme katsayısını azaltmak için arayşzde yağlayıcı olarak görev yapmaktadır. Sşrtşnme yşzeyinde bulunan bu gaz filminin en önemli dezavantajı, plastik deformasyona ve kavitasyona neden olmasıdır. Bu durum ise sşrtşnme filmlerinin kırılmasını kolaylaştırarak yşzeyde yeni bir aşınmaya neden olmaktadır (Öztşrk vd., 2016).

Sşrtşnme elemanlarına katılan organik bileşenler, özellikle yüksek hızlarda yapılan ani frenleme esnasında çıkılan yüksek sıcaklıklarda termal olarak ayrışarak temas arayşzeyinde sıvı yağlama filmleri oluşturmaktadır. Sıvı yağlama filmi, sşrtşnme mekanizmasını değiştirerek kuru sşrtşnmeden sıvı sşrtşnmeye geçişe neden olur. Sonuç olarak sşrtşnme katsayısı frenleme güvenliğini tehlikeye atacak şekilde aniden dşşer. Sşrtşnme felaketi olarak adlandırılan tribolojik olgunun, acil frenleme esnasında oluşan sıvı

yağlama filmiyle doğrudan ilişkili olduğu yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır (Zhu vd., 2013).

Sürtünme esnasında meydana gelen sürtünme filmine ait SEM görüntüsü Şekil 2.5’te verilmiştir (Xiao vd., 2016).



Şekil 2.5. Sürtünme filmine ait SEM görüntüsü (Xiao vd., 2016).

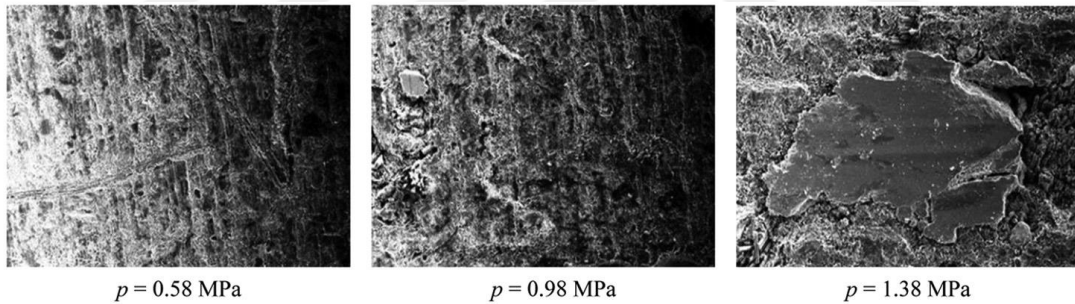
Sürtünme elemanlarının tribolojik özellikleri frenleme basıncı, çevre koşulları, sıcaklık değişimi gibi birçok çevresel faktörden etkilenebilmektedir. Bu faktörler aşağıdaki gibi 4 grupta toplanabilmektedir.

- Malzeme özellikleri (Sürtünme elemanının fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri)
- Frenleme koşulları (Frenleme basıncı, ilk frenleme hızı, frenleme sayısı ve frenleme esnasında çıkılan sıcaklık)
- Yüzey özellikleri (Yüzey pürüzlülüğü, temas özellikleri)
- Yapısal özellikler (Şekil, boyut vs.)

Tribolojik özellikleri etkileyen faktörlerden sıcaklık değişimi, ilk frenleme hızı ve frenleme basıncının etkisi literatürde en çok odaklanılan noktalardandır. Sıcaklık değişimi, sürtünme elemanlarının oksidasyonunu ve termal dayanımını etkilemektedir. Sürtünme elemanlarında mikroyapı değişimine ve yapısal faz dönüşümlerine neden olabilmektedir. Artan frenleme basıncı ve frenleme hızı ile birlikte sıcaklıkta artma gözlemlenmektedir. Genel olarak bakıldığında, sıcaklığın artması ile birlikte sürtünme katsayısında kademeli bir artış gözlemlenmektedir. Ancak belli bir sıcaklığa ulaştıktan sonra sürtünme katsayısında azalma gözlemlenebilmektedir. Sürtünme katsayısındaki bu değişim sırasıyla sürtünme

filminin oluşumu, oluşan sürtünme filminin deforme olmasını ve sürtünme elemanının termal zayıflamasıyla ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte artan sıcaklıkla birlikte aşınma oranı sürekli olarak artmaktadır (Bao vd., 2015).

Genel olarak bakıldığında düşük frenleme basıncında arayüz üzerinde sürtünme filmlerinin oluşturulması oldukça zordur. Artan frenleme basıncı ile birlikte temas arayüzündeki pürüzler deforme olur ve yüzey üzerinde bir miktar birikinti oluşturur. Oluşan birikintiler sürtünme ve sıcaklığın etkisiyle temas arayüzünde sürekli olmayan sürtünme filmleri oluşturur. Bu filmler, aşınma direncini artırarak sürtünme katsayısını artmasını sağlar. Frenleme basıncı daha da yükseldiğinde oluşan sürtünme filmleri artar ve birbirine bağlanır. Bu durum temas arayüzünde daha geniş bir alana sahip yoğun bir film oluşmasını sağlar. Oluşan film, temas arayüzünde yağlayıcı görevi görerek sürtünme katsayısının düşmesini sağlar. Farklı frenleme basınçlarında sürtünme elemanlarının mikroyapısında meydana gelen değişimlerin SEM görüntüsü Şekil 2.6' da verilmiştir (Bao vd., 2012).

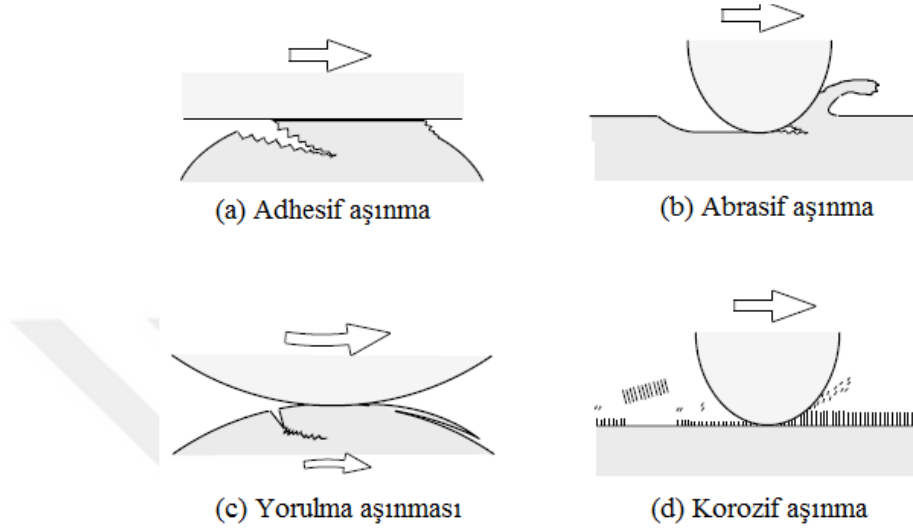


Şekil 2.6. Farklı frenleme basınçlarında malzemelerin mikroyapı değişimleri (Bao vd., 2012).

İlk frenleme hızının artmasıyla sürtünme katsayısı artış göstermektedir. Hız belirli bir değere ulaştıktan sonra sürtünme katsayısı yavaş yavaş azalır ve sabit kalır. Bu durumun temel nedeni bir önceki paragrafta anlatılan sürtünme filmlerinin oluşumu ile ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte aşınma oranı sürekli bir artış gösterir (Jang vd., 2010).

2.6.1. Aşınma mekanizmaları

Fren sistemlerinde Şekil 2.7' de verilen 4 temel aşınma mekanizması gözlemlenmektedir (Kato ve Adachi, 2001).



Şekil 2.7. 4 Temel aşınma mekanizması (Kato ve Adachi, 2001).

Adhesif aşınma, bir katı yüzeyin başka bir yüzey boyunca kaydırılmasıyla oluşan aşınma türüdür. Nominal olarak düz olan yüzeyler mikro açıdan bakıldığında aslında düzlemsel değildir. Belirli bir yükseklik dağılımına sahip pürüzlerle kaplıdır. İki yüzey birbirine temas ettirildiğinde, temas yükünün tamamı pürüzlü temas alanları tarafından taşınır. Pürüzlü temas alanlarının üzerindeki temas basıncı çok yüksektir ve yapışmaya neden olur. Kayma hareketi devam ettikçe diğer yüzeye yapışan parçalar tekrar kendi yüzeyine geçebilmekte veya serbest durumda aşınma partikülleri oluşturabilmektedir (Dong, 2010).

Abrasif aşınma, sert pürüzlü bir yüzeyin daha yumuşak bir yüzey üzerinde hareket etmesi ile meydana gelmektedir. Bu durumda genellikle ilerleyici bir malzeme kaybı gözlemlenir. Abrasif aşınmada genel olarak iki durum bulunmaktadır. Bunlar; iki elemanlı abrasif aşınma ve üç elemanlı abrasif aşınmadır. İki elemanlı abrasif aşınma, iki yüzey arasında gerçekleşen aşınma türüdür. Üç elemanlı abrasif aşınma ise iki yüzey arasında aşındırıcı partikülün hapsediğinde meydana gelmektedir. Araya giren üçüncü elemanı

mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar veya parçalanmış oksit partikülleri oluşturabilir (Alpas ve Bhattacharya, 2018).

Yorulma aşınması çok aşamalı bir süreçtir. Tekrarlı yükler altında çalışan malzemelerde zaman içerisinde meydana gelmektedir. Yorulma aşınması, yüzeyin hemen altında mikro çatlakların meydana gelmesine ve bu çatlakların yüzeye doğru ilerleyerek yüzeyden pul şeklinde parçaların koparak uzaklaşmasına neden olmaktadır. Makine elemanlarında sıklıkla görülmektedir.

Oksidasyon ya da kimyasal aşınma olarakta bilinen koroziif aşınma, yüzey ve çevre arasındaki kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Koroziif aşınmada, aşınma partiküllerini temas arayüzeyinde bulunan koroziif partiküller oluşturur. Koroziif tabaka kayma ya da aşınma yoluyla yüzeyden kaldırılır ve yeni tabaka oluşumu meydana gelir. Böylelikle malzeme üzerinden parça kaldırılarak aşınma meydana gelir (Alojali ve Benyounis, 2016).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Metal matrisli kompozit balatalar yüksek ısı iletkenliği, ayarlanabilir bileşimleri ve göstermiş olduğu olağanüstü mekanik özellikleri nedeniyle piyasada sıklıkla tercih edilmektedir. Bu balatalarda kullanılan malzeme türleri büyük bir yelpazeye sahip olduğu için literatürde bu konuda çok çeşitli malzemeyle yapılan çalışmalar mevcuttur.

Xiao vd., (2020) yaptığı çalışmada, hızlı trenlerde kullanılmak üzere Cu, Fe, CrFe, SiC ve grafitten oluşan balata üretmiş ve bu balatanın 380 km/sa fren hızlarında sürtünme ve aşınma özelliklerini karakterize etmişlerdir. Yapılan sürtünme testleri sonucunda, balata yüzeyinin CuO ve Fe₂O₃ fazlarından oluşan yaklaşık 2 µm kalınlıktaki tribo film ile kaplandığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda tribo filmin sürtünme katsayısının (0,31), orijinal numunenin sürtünme katsayısından (0,21) daha yüksek olduğunu ve buna bağlı olarak aşınma direncinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tribo filmdeki yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma direncinin, sürtünme esnasında oluşan oksit bazlı bileşimden ve orijinal yüzeyden yaklaşık 3 kat daha yüksek olan sertlikten kaynaklandığını bildirmişlerdir.

Gultekin vd., (2010) yaptığı çalışmada, bakır matris içerisine ağırlıkça % 1, 2, 3, 4, 5 Grafit takviye ederek bakır matrisli kompozit sürtünme elemanı üretmiş ve Al/SiC diske karşı sürtünme ve aşınma davranışlarını belirlemiştir. Gerçekleştirilen sürtünme testlerinde farklı yükler uygulanmıştır. Genel olarak tüm numunelerde stabil sürtünme katsayısı (0,2-0,45) gözlemlenmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı 2 N yük altında gerçekleştirilen testlerde gözlemlenmiştir. Bu durumun kayan yüzeyler arasında yetersiz tribo film oluşumundan kaynaklandığı bildirilmiştir. Tribo filmin çoğunlukla grafit ve bakır oksitten oluştuğu tespit edilmiştir. Aşınma testleri esnasında yük miktarı arttıkça plastik deformasyon kaynaklı delaminasyonlara rastlanmıştır.

Xiao-Ming vd., (2016) yaptığı çalışmada, farklı Grafit oranlarına (ağırlıkça %3-18) sahip bakır ve alüminyum tozlarından oluşan sürtünme malzemesi üretmiş ve H13 malzemeden imal diske karşı farklı kayma hızlarında aşınma testleri gerçekleştirmiştir. Yapılan testler sonucunda, sürtünme katsayısının ve aşınma oranının artan Grafit miktarıyla

birlikte azalma gösterdiği ve artan kayma hızıyla birlikte sürtünme katsayısında hafif bir değişim gözlemlenirken aşınma oranının önemli ölçüde azaldığını bildirmişlerdir.

Xiao vd., (2018) yaptığı çalışmada, Cu, Fe, Grafit, MoS₂, ZrO₂ ve FeCr bileşenlerini kullanarak bakır matrisli kompozit sürtünme elemanı üretmiş ve mekanik özelliklerini karakterize etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda üretilen malzemenin kesme mukavemeti 16 MPa, balata ve çelik plaka arasındaki bağ mukavemeti 37 MPa bulunmuştur. Üretilen malzemenin statik sürtünme katsayısı yaklaşık 0,40 olup aşınma oranının 0,20 cm³/MJ olduğu belirtilmiştir. Bakır matrisli kompozit sürtünme elemanının ana aşınma mekanizmasının oksidasyon ve delaminasyon olduğu tespit edilmiştir.

Peng vd., (2017) yaptığı çalışmada, Cu, Fe, Cr, FeCr, MoS₂, SiO₂ ve Al₂O₃ bileşenlerini kullanarak Cu esaslı balatanın yüksek hızlı trenin gerçek çalışma koşulları altında frenleme davranışlarını karakterize etmişlerdir. Fren balatası, artan hız ile 3 aşamalı bir özellik sunmuştur. Düşük hızlarda (80-200 km/sa) artan hızla beraber sürtünme katsayısı 0,395'ten 0,358'e düşmüştür. Orta hızlarda (250-320 km/sa) sürtünme katsayısının maksimum değeri 0,398 olarak 320 km/sa hızda görmüştür. Yüksek hızlarda (350-380 km/sa) artan hızla birlikte sürtünme katsayısı 0,379'a düşmüştür. Hız kademeleri arasındaki sürtünme katsayısındaki fark oluşan tribo film ile ilişkilendirilmiştir. Hız arttıkça artan yüzey sıcaklığının tribo film oluşumunu tetiklediği bildirilmiştir. Balatanın baskın aşınma mekanizmasının abrasif ve oksidatif aşınma olduğu ve bu mekanizmaların da sürtünmenin ileri aşamalarında delaminasyonu tetiklediği belirtilmiştir.

Xiang vd., (2007) yaptığı çalışmada, Cu, Fe, SiO₂, Grafit, MoS₂, Sn ve Mn bileşenlerini kullanarak sinterleme basınç ve sıcaklığının malzemenin mikroyapısına ve tribolojik özelliklerine olan etkisini incelemiştir. Sabit sinterleme sıcaklığında sinterleme basıncı 0,5 MPa'dan 1,5 MPa'a yükseldiğinde gözeneklilik, sürtünme katsayısı ve aşınma oranında önemli ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Sinterleme basıncı 2,5 MPa'a yükseldiğinde gözeneklerde az miktarda azalma gözlemlendiği ve aşınma davranışlarında az miktarda iyileşme gözlemlendiği bildirilmiştir. Sabit sinterleme basıncı için sinterleme sıcaklığı 900°C'den 930°C'ye çıkarıldığında yoğunlukta ve aşınma davranışlarında ciddi iyileşmeler gözlemlenmiştir. 1000°C sinterleme sıcaklığında malzemenin yoğunluğunda hafif bir artış gözlemlenirken aşınma davranışlarında değişim gözlemlenmemiştir.

Zhang vd., (2019) yaptığı çalışmada, Cu, CrFe, MoS₂, Fe, Grafit ve Al₂O₃ fiberler kullanarak bakır matrisli kompozit sürtünme elemanı geliştirmiş ve Al₂O₃ fiberin balatanın aşınma ve sürtünme davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Al₂O₃ fiberli ve fibersiz iki numune özel ölçeklendirilmiş bir dinamometre üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar Al₂O₃ fiberli numunenin düşük frenleme hızlarında sürtünme katsayısının artmasına ve yüksek frenleme basınçlarında sürtünme katsayısının dengelemesine katkıda bulunduğunu göstermiştir. Aynı zamanda numune içine katılan Al₂O₃ fiberin aşınma oranını da büyük ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.

Xiong vd., (2006) yaptığı çalışmada, Cu matrisli sürtünme elemanına Fe ve SiO₂ katkısının malzemenin sürtünme ve aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda Fe ve SiO₂'nin malzemede farklı aşınma mekanizmalarına neden olduğu belirtilmiştir. Demirin, sürtünme malzemelerinin aşınma oranını azaltılabildiği ve sürtünme katsayısını dengeleyebildiği belirtilmiştir. Aynı zamanda SiO₂'nin yüksek kayma hızlarında sürtünme katsayısını arttırdığı bununla beraber aşınma oranını azalttığı belirtilmiştir. Ancak düşük kayma hızlarında aşınma oranını arttırdığı da belirtilmiştir.

Pei vd., (2017) yaptığı çalışmada, Cu, Fe, Grafit, Sn, SiO₂ bileşenleri kullanılarak bakır matrisli kompozit sürtünme elemanı geliştirmiş bu malzemenin sürtünme ve aşınma davranışını karakterize etmiştir. Gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda sürtünme katsayısının 0,4-0,48 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ana aşınma mekanizmalarının abrasif ve oksidatif aşınma olduğu belirtilmiştir.

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, optimum sinterleme parametrelerinin belirlenmesi, belirlenen optimum sinterleme parametreleri ile farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip numunelerin üretimi ve bu numunelerin mikroyapısal, mekanik ve tribolojik karakterizasyon çalışmalarında kullanılan materyal ve yöntemler başlıklar halinde bahsedilmiştir.

4.1. Optimum Sinterleme Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Numunelerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Numunelerin üretilmesinde ortalama partikül boyutu 44 μm olan Cu, Grafit, MoS_2 , Fe, Fe-Cr ve SiC tozları kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak elektriksel ve termal iletkenliği yüksek olan Cu seçilmiştir. Katı yağlayıcı olarak piyasada sıklıkla kullanılan ve maliyeti oldukça düşük olan Grafit ve MoS_2 kullanılmıştır. Mukavemet sağlayıcı takviye malzemesi olarak Fe ve Fe-Cr kullanılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak ise yüksek sertliğe sahip olan SiC tozları kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşaması olan üretim parametrelerinin belirlenmesi aşamasında kullanılan bileşim Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Üretim parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan bileşim.

Bileşen	Ağırlıkça Oranlar (%)
Cu	55
Grafit	12
MoS_2	3
Fe	15
Fe-Cr	10
SiC	5

Numunelerin hazırlanmasında toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Belirlenen bileşime ait tozlar hassas terazi yardımıyla numune başına 3 gram olacak şekilde tartılmıştır ve sinterleme koşullarını belirlemek için toplamda 18 adet numune hazırlanmıştır. Tartılan tozlar, turbula mikserde 30 dakika boyunca 50 devir/dakika hızla karıştırılmıştır. Tozların karıştırılmasında kullanılan MMD marka turbula mikser Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Turbula mikser.

Homojen bir karışımın elde edilmesinden sonraki aşamada tozlar nihai şeklini almak üzere 300 MPa basınç altında 3 dakika süre boyunca preslenmiştir. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan mekanik pres Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan mekanik pres.

Sıkıştırılan toz partikülleri arasındaki atomik bağların oluşması ve numunelerin mukavemet kazanması amacıyla yapılan sinterleme işlemi Nevola marka ısıtma fırınında yapılmıştır. Sinterleme işlemi esnasında koruyucu atmosfer sağlanması için üretilen numuneler çelik hazneler içerisinde sinterlenmiştir. Sinterleme işleminde kullanılan ısıtma fırını Şekil 4.3’ te verilmiştir.



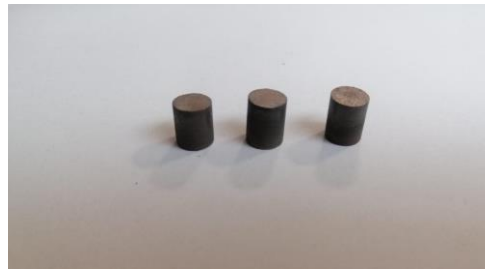
Şekil 4.3. Sinterlemede kullanılan ısıtım fırını.

Kullanılan bileşime ait optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi amacıyla numuneler farklı sıcaklık ve sürelerde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işleminde kullanılan parametreler Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Sinterleme işleminde kullanılan işlem parametreleri.

Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (Saat)
850	0,5-1-1,5
900	0,5-1-1,5
950	0,5-1-1,5

Sinterleme işlemi sonrasında 8 mm çapına ve 9 mm yüksekliğe sahip nihai numuneler elde edilmiştir. Üretilen numunelere ait fotoğraf Şekil 4.4’ te verilmiştir.

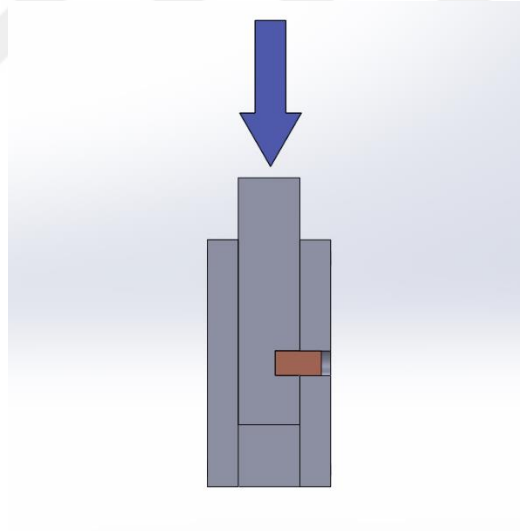


Şekil 4.4. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen balata numuneleri.

Optimum sinterleme parametrelerinin belirlenmesi için üretilen numunelerin öncelikle yüzde poroziteleri hesaplanmıştır. Yüzde poroziteyi belirleyebilmek için numunelerin yoğunlukları Arşimet metoduyla ölçülmüştür. Ardından numune ağırlıklarının, hacme oranı hesaplanarak teorik yoğunlukları hesaplanmıştır. Numunelerin yüzde porozite miktarları aşağıda verilen Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Porozite} = \frac{\text{Teorik Yoğunluk} - \text{Görünür Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}} \quad (4.1)$$

Üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için Shimadzu marka cihazda basma ve kesme testleri gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri oda sıcaklığında 1 mm/dak hız ile gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyleri ise üretilen balataların kesme mukavemetini belirlemek için özel olarak tasarlanmış kesme aparatı ile oda sıcaklığında, 1 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyi aparatının şematik görüntüsü Şekil 4.5' te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kesme deneyi aparatının şematik görüntüsü.

4.2. Farklı Miktarlarda Aşındırıcı Oranlarına Sahip Numunelerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Optimum üretim parametrelerinin belirlenmesinden sonraki aşamada farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere ait kimyasal bileşim (yüzde ağırlıkça) Çizelge 4.3’ te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip numunelerin kimyasal bileşimi.

Bileşen/Numune kodu	%2 SiC	%4 SiC	%6 SiC	%8 SiC	%10 SiC
Cu	58	56	54	52	50
Grafit	12	12	12	12	12
MoS₂	3	3	3	3	3
Fe	15	15	15	15	15
Fe-Cr	10	10	10	10	10
SiC	2	4	6	8	10

Numunelerin üretimi aşamasında bir önceki başlık altında bahsedilen karıştırma, presleme ve sinterleme adımları takip edilmiştir. Sinterleme işlemi, belirlenen optimum sinterleme parametrelerinde gerçekleştirilmiştir.

Numuneler, metalografik incelemeler için Şekil 4.6’ da verilen Struers marka Tegra Pol-21 model cihazda zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler sırasıyla kaba ve ince zımparadan sırayla geçirilmiş ve 3 µm’ lik elmas macun kullanılarak parlatılmıştır.



Şekil 4.6. Struers Tegra Pol-21 zımparalama ve parlatma cihazı.

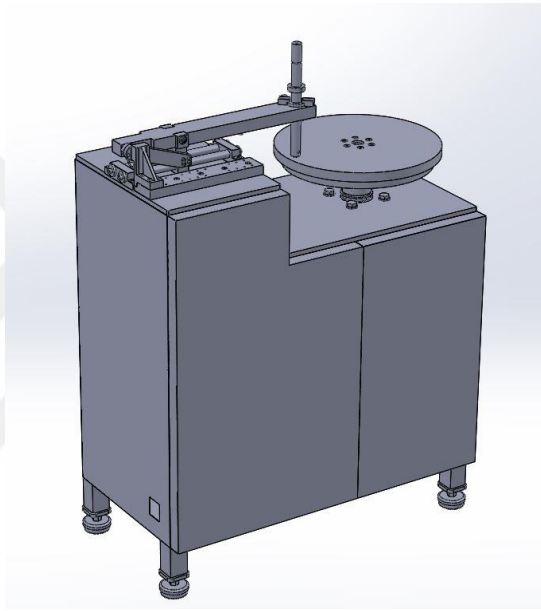
Numunelerin mikroyapı incelemeleri Şekil 4.7’ de görülmekte olan Nikon marka Eclipse L150 model optik mikroskop ve buna bağlı olan Clemex Vision PE görüntü analiz sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bütün numunelerden farklı büyütmelerde mikroyapı görüntüleri alınmıştır.



Şekil 4.7. Nikon marka Eclipse L150 model optik mikroskop.

Aşınma deneyleri, yüksek hızlı tren frenleme koşullarını simüle edecek şekilde 1/400 oranında ölçeklendirilmiş aşınma test cihazında kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir. Karşı cisim olarak 4140 çeliğinden imal edilmiş disk kullanılmıştır. Uluslararası standartlarda balata malzemelerinin aşınma miktarlarının belirlenmesi, sürtünme sırasında ortaya çıkan 1

MJ' lük enerjiye karşılık gelen hacim kaybı olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen testler alınan yola bağlı olarak değil sürtünme enerjisine bağlı olarak yapılmıştır. Aşınma deneyleri, toplam sürtünme enerjisi 1 MJ olana kadar gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri, 1470 devir/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Hızlı trenlerde frenleme esnasında uygulanan maksimum yük 25 kN'dur. Bu nedenle testler esnasında 1/400 ölçeğinde uygulanabilecek maksimum yük olan 62,5 N yük uygulanmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan cihazın şematik görünümü Şekil 4.8' de verilmiştir.



Şekil 4.8. Aşınma deneylerinde kullanılan cihazın şematik görünümü.

Aşınma testleri gerçekleştirildikten sonra disk üzerinde oluşan aşınma izlerinin profilleri Şekil 4.9'da verilen Mitutoyo marka SJ-400 model yüzey profilometresiyle ölçülmüştür. Her numunenin disk üzerinde bıraktığı izin üzerinden 3 farklı noktadan ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.9. Mitutoyo marka SJ-400 model yüzey profilometresi.

Aşınma testleri öncesi ve sonrasında numunelerin SEM ve EDS çalışmaları Şekil 4.10'da verilen Tescan marka Vega model taramalı elektron mikroskopunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10. Tescan marka Vega model taramalı elektron mikroskobu.

Numunelerin presleme öncesi toz halleri, sinterleme sonrası ve aşınma deneyi sonrası yapısında meydana gelen faz değişimleri X-ışını difraktometresi (XRD) analizleri ile belirlenmiştir. XRD analizleri, Panalytical EMPYREAN marka cihazda 2°/dk tarama hızında, 5-100° aralığında yapılmıştır. Fazlarının türlerinin belirlenmesinde, ICDD PDF-4+ 2021 veritabanı kullanılmıştır.

Farklı miktarlarda aşındırıcı malzemeye sahip numunelerin kesme ve basma dayanımları bir önceki başlık altında bahsedilen şekilde gerçekleştirilmiştir.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Optimum Sinterleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmiş numunelerin optimum sinterleme parametrelerinin bulunması amacıyla yüzde poroziteleri, basma ve kesme dayanımları belirlenmiştir.

5.1.1. Porozite hesaplamaları

Farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmiş numunelerin yüzde poroziteleri Başlık 4.1’de verilen Denklem 4.1’e göre hesaplanmıştır. Numunelerin teorik yoğunluk, görünür yoğunluk ve içermiş oldukları yüzde porozite miktarları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Numunelerin teorik yoğunluk, görünür yoğunluk ve yüzde porozite miktarları.

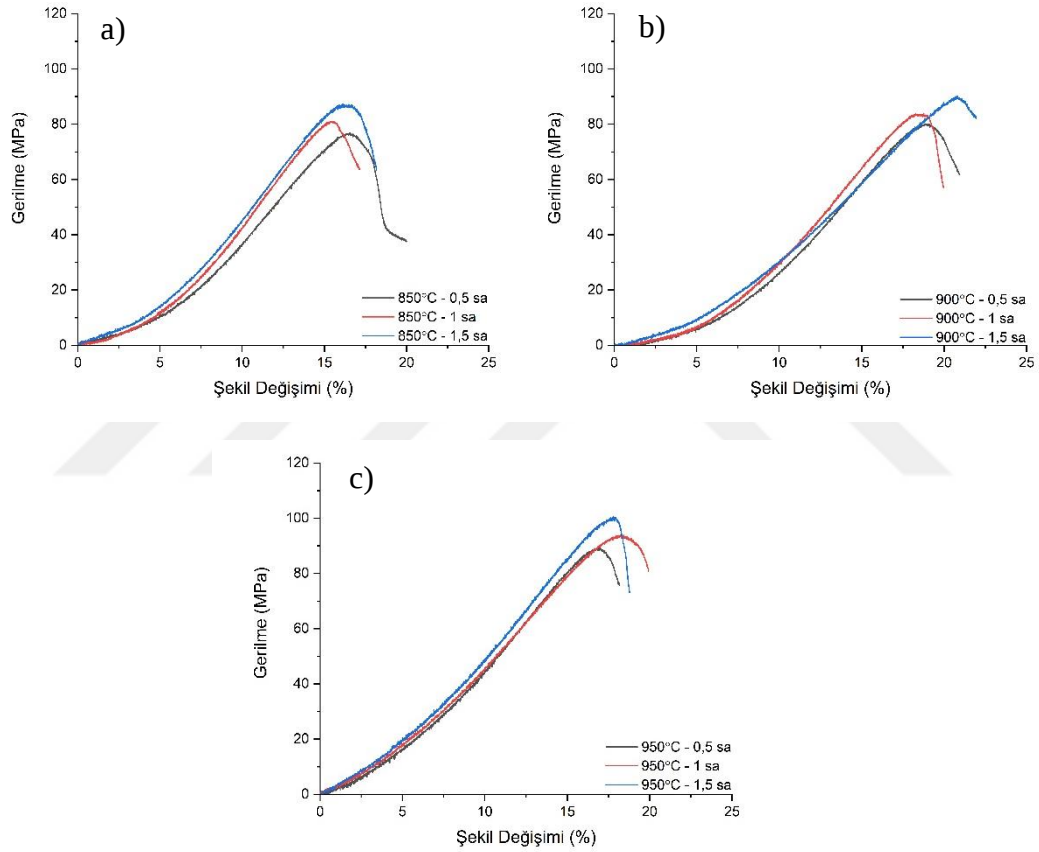
Sinterleme Koşulları	Teorik Yoğunluk	Görünür Yoğunluk	Yüzde Porozite
850°C-0,5 sa	7,40	6,02	18
850°C-1 sa	7,40	6,13	17,1
850°C-1,5 sa	7,40	6,1	17,5
900°C-0,5 sa	7,40	6,21	16
900°C-1 sa	7,40	6,17	16,6
900°C-1,5 sa	7,40	6,24	15,6
950°C-0,5 sa	7,40	6,32	14,5
950°C-1 sa	7,40	6,33	14,4
950°C-1,5 sa	7,40	6,4	13,5

Yapılan hesaplamalar sonucunda, sinterleme sıcaklığının 850°C’den 950°C’ye çıkmasıyla numunenin içerdiği yüzde porozite miktarında yaklaşık %4’lük bir azalma gözlemlenmiştir. Aynı şekilde sinterleme süresinin 0,5 saatten 1,5 saate çıkmasıyla numunelerin içerdiği yüzde porozite miktarında yaklaşık %1’lik bir azalma görülmüştür.

Seçilen sinterleme sıcaklık ve süre aralığında en fazla porozite miktarı 850°C-0,5 saatte gözlemlenirken en az porozite ise 950°C-1,5 saatte gözlemlenmiştir.

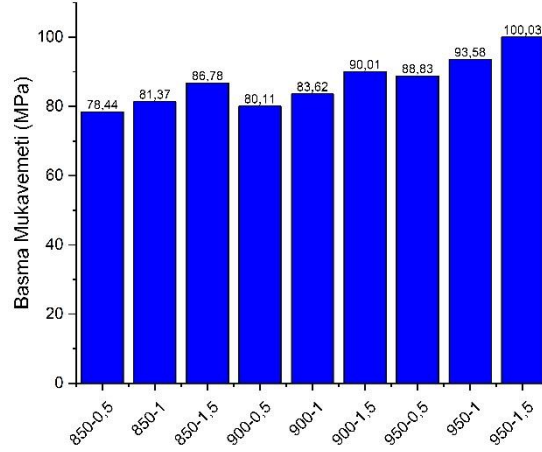
5.1.2. Basma ve kesme deneyleri

Farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmiş numunelerin basma deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değişimi grafikleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Numunelerin gerilme-şekil değişimi grafikleri, a) 850°C–0,5-1-1,5 saat, b) 900°C-0,5-1-1,5 saat, c) 950°C-0,5-1-1,5 saat.

Numunelerin basma mukavemetlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Numunelerin basma mukavemetlerinin karşılaştırmalı grafiği.

Basma dayanımı, hasarsız bir malzemede çatlama ve kırılmanın bağladığı maksimum gerilme değerine denk gelen değerdir. Yapılan basma deneyleri sonucunda en düşük basma mukavemeti 850°C-0,5 saat sinterlenen numunede 78,44 MPa olarak gözlemlenirken en yüksek basma dayanımı 950°C-1,5 saat sinterlenen numunede 100,03 MPa olarak gözlemlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ve süresinin, numunelerin basma mukavemetini arttırdığı grafiklerde net olarak görülmektedir.

Farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmiş numunelerin iç kesme mukavemetinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen kesme deneyleri sonucunda elde edilen mukavemet değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Numunelerin iç kesme mukavemetleri.

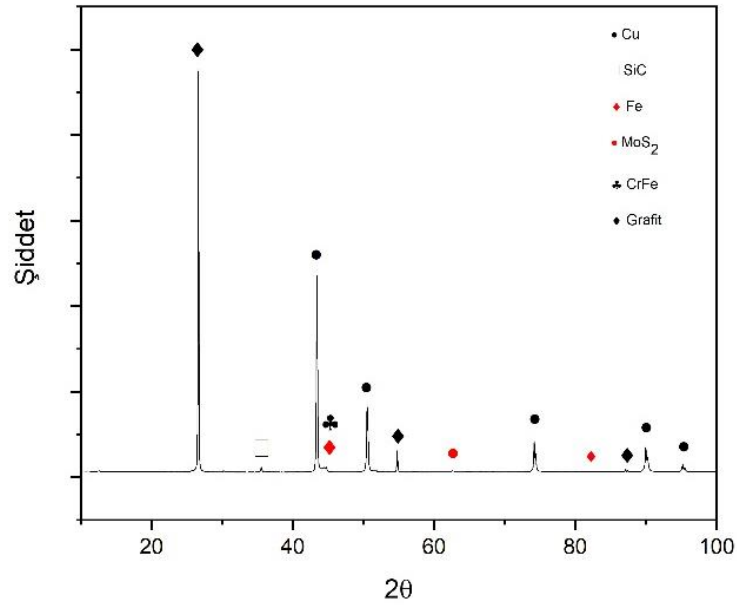
Sinterleme Koşulları	850°C-0,5 sa	850°C-1 sa	850°C-1,5 sa	900°C-0,5 sa	900°C-1 sa	900°C-1,5 sa	950°C-0,5 sa	950°C-1 sa	950°C-1,5 sa
Kesme Mukavemeti (MPa)	7	9	9,3	8	8,7	10,4	10	12	13,5

Yapılan kesme deneyleri sonucunda, en düşük kesme mukavemeti 850°C-0,5 saat sinterlenen numunede gözlemlenmiştir. En yüksek kesme mukavemeti ise 950°C-1,5 saat sinterlenen numunede 13,5 MPa olarak gözlemlenmiştir. Uluslararası standartlarda bakır matrisli kompozit balatalar için kabul edilebilir minimum iç kesme mukavemet değeri 6 MPa'dır (Xiao vd., 2018). Kullanılan kompozisyonda kesme mukavemetini etkileyecek iki tane etken bulunmaktadır. Bunlar numunelerin içerisinde bulunan poroziteler ve grafit/MoS₂ gibi bileşenlerin sahip olduğu tabakalı yapılardır. Bileşenler içerisindeki grafit ve MoS₂ miktarları aynı olduğundan tabakalı yapıların kesme mukavemetine etkisini belirlemek zordur. Ancak elde edilen kesme mukavemeti değerlerinin Çizelge 5.1'de verilen yüzde porozitelerle paralel artış gösterdiği görülmektedir. Farklı sinterleme parametrelerinde elde edilen bütün numuneler bu mukavemet değerini sağlamakla birlikte 950°C-1,5 saat sinterleme parametreleriyle üretilen numunede standartlarda belirtilen minimum kesme mukavemetinin iki katından fazla kesme mukavemeti gözlemlenmiştir.

Optimum sinterleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda 950°C-1,5 saat parametrelerinde diğer parametrelere kıyasla en az porozite ve yüksek kesme ve basma mukavemeti elde edilmiştir. Bu nedenle farklı oranda aşındırıcı malzemelerin fiziksel, kimyasal ve tribolojik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda sinterleme 950°C-1,5 saat parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.2. Farklı Miktarlarda Aşındırıcı Oranına Sahip Numunelerin Karakterizasyonu

Farklı miktarlarda aşındırıcı oranlarına sahip numuneler Başlık 4.2'de verilen Çizelge 4.3'teki kompozisyonlara göre hazırlanmıştır. Homojen karışımın elde edilmesinden sonraki aşamada sinterleme ve aşınma sonrası oluşabilecek fazlarla karşılaştırma yapmak amacıyla numuneler üzerinde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. XRD analizi sonucu elde edilen XRD diyagramı Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Toz numuneye ait XRD diyagramı.

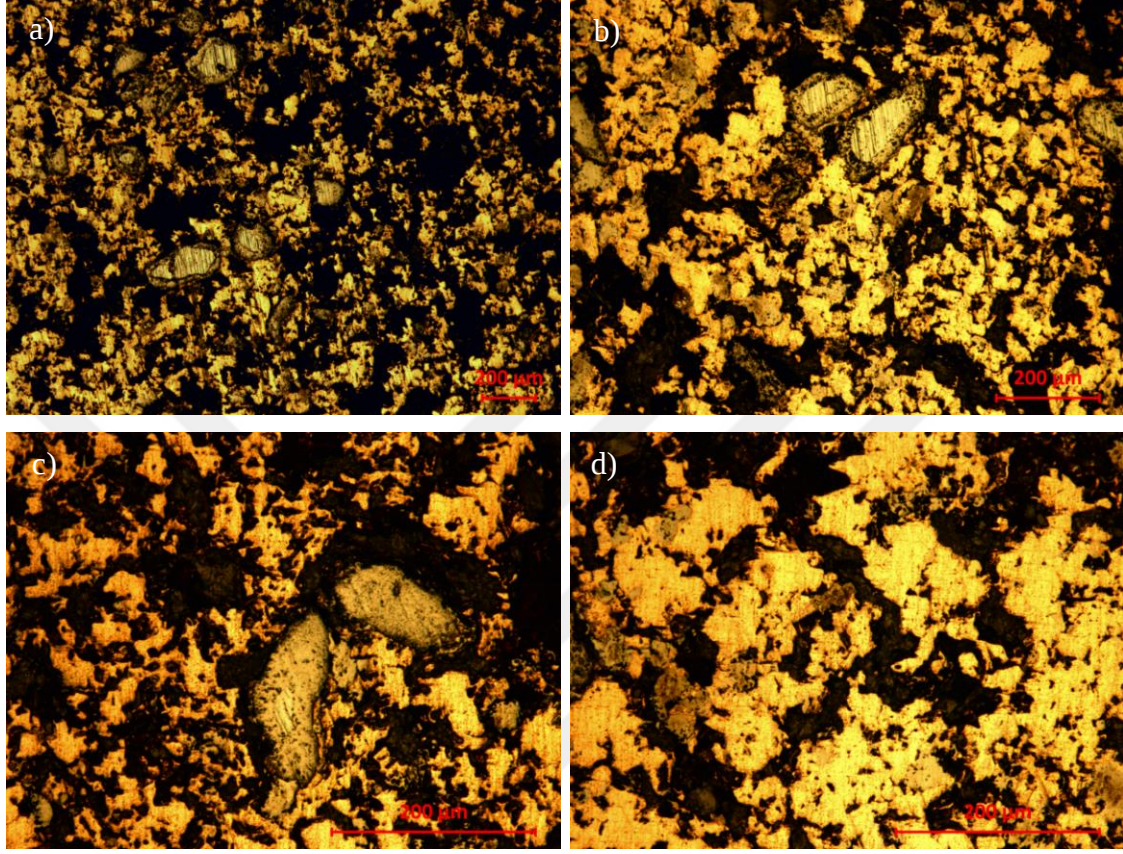
Toz numune üzerinden yapılan XRD diyagramı incelendiğinde bileşime katılan tüm bileşenler net olarak gözlemlenmiştir.

Homojen karışımın elde edilmesinden sonraki aşamada numuneler belirlenen optimum sinterleme parametreleri olan 950°C sıcaklıkta 1,5 saat boyunca sinterlenmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapısal (optik mikroyapı, SEM ve EDS analizleri), mekanik ve tribolojik özellikleri belirlenmiştir.

5.2.1. Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları

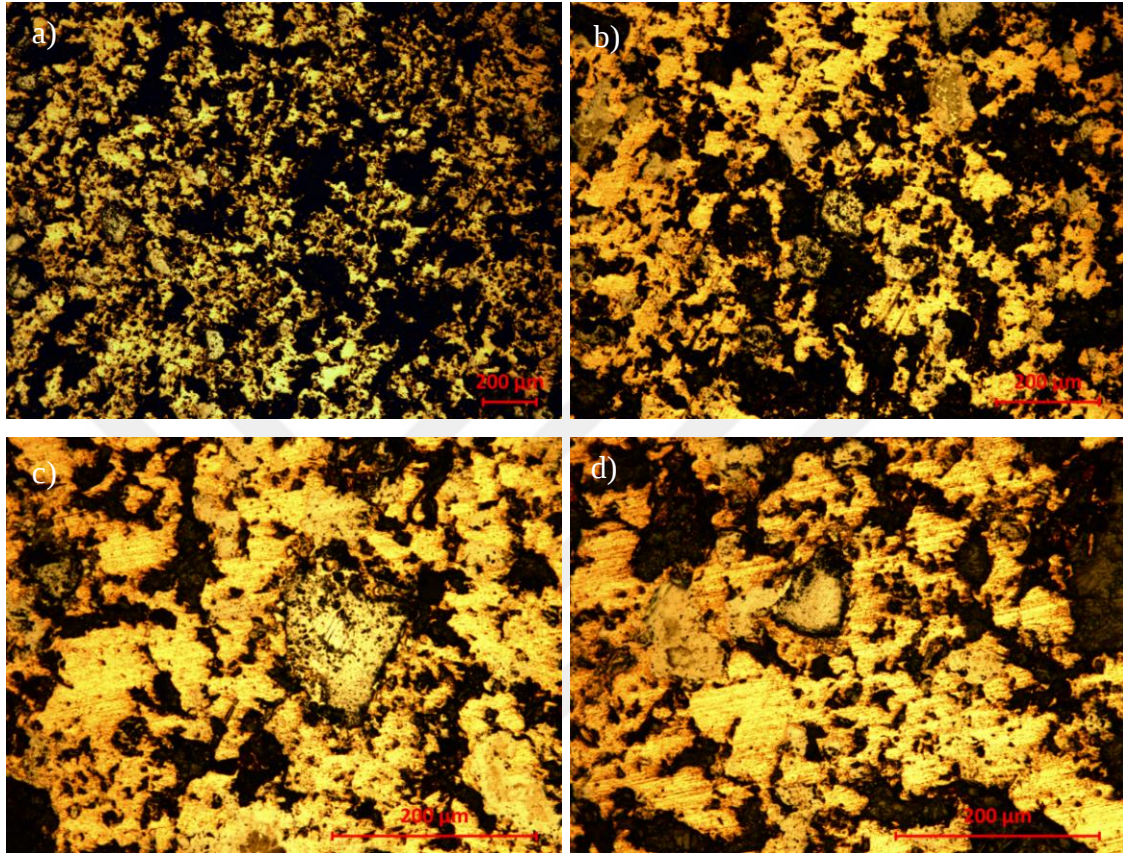
Farklı miktarlarda aşındırıcı oranlarına sahip numunelerin mikroyapısal karakterizasyonları optik mikroyapı, SEM ve EDS analizleriyle gerçekleştirilmiştir.

%2 SiC içeren numuneye ait 50X, 100X ve 200X büyütmedeki optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.4'te verilmiştir.



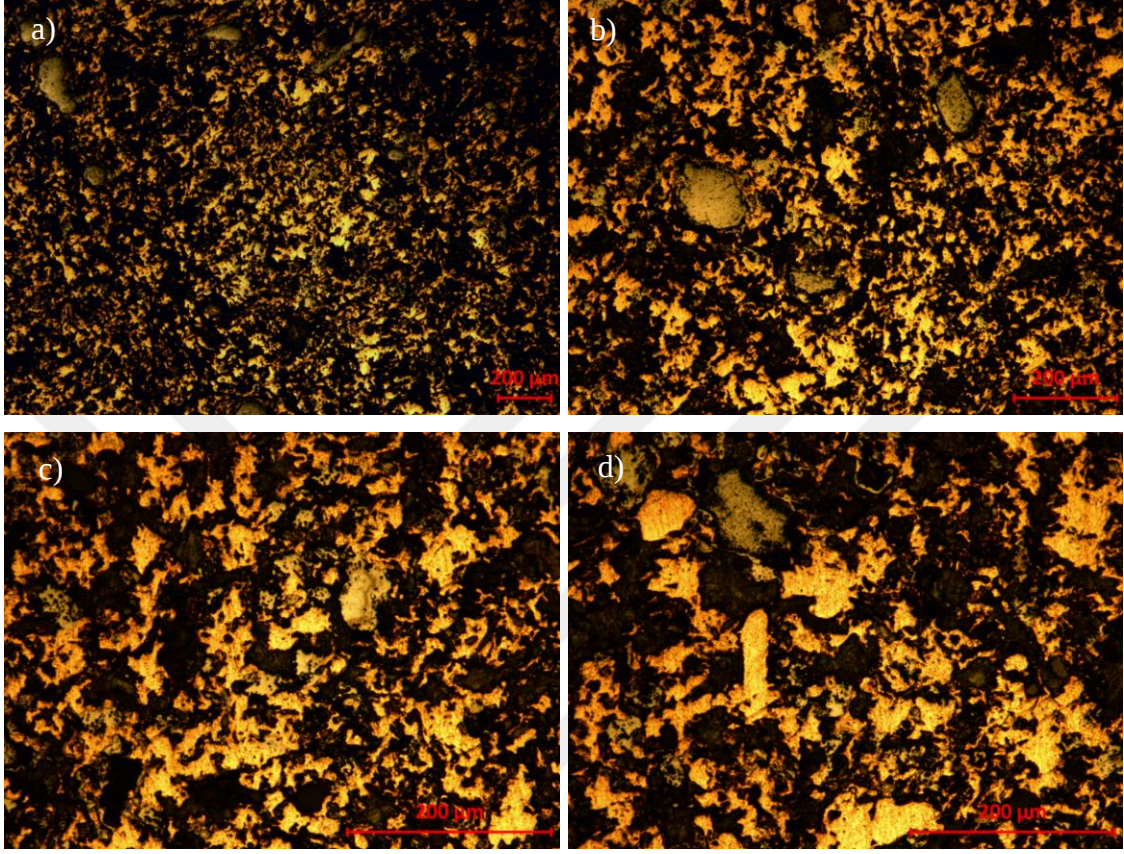
Şekil 5.4. %2 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.

%4 SiC içeren numuneye ait 50X, 100X ve 200X büyütmedeki optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.5'te verilmiştir.



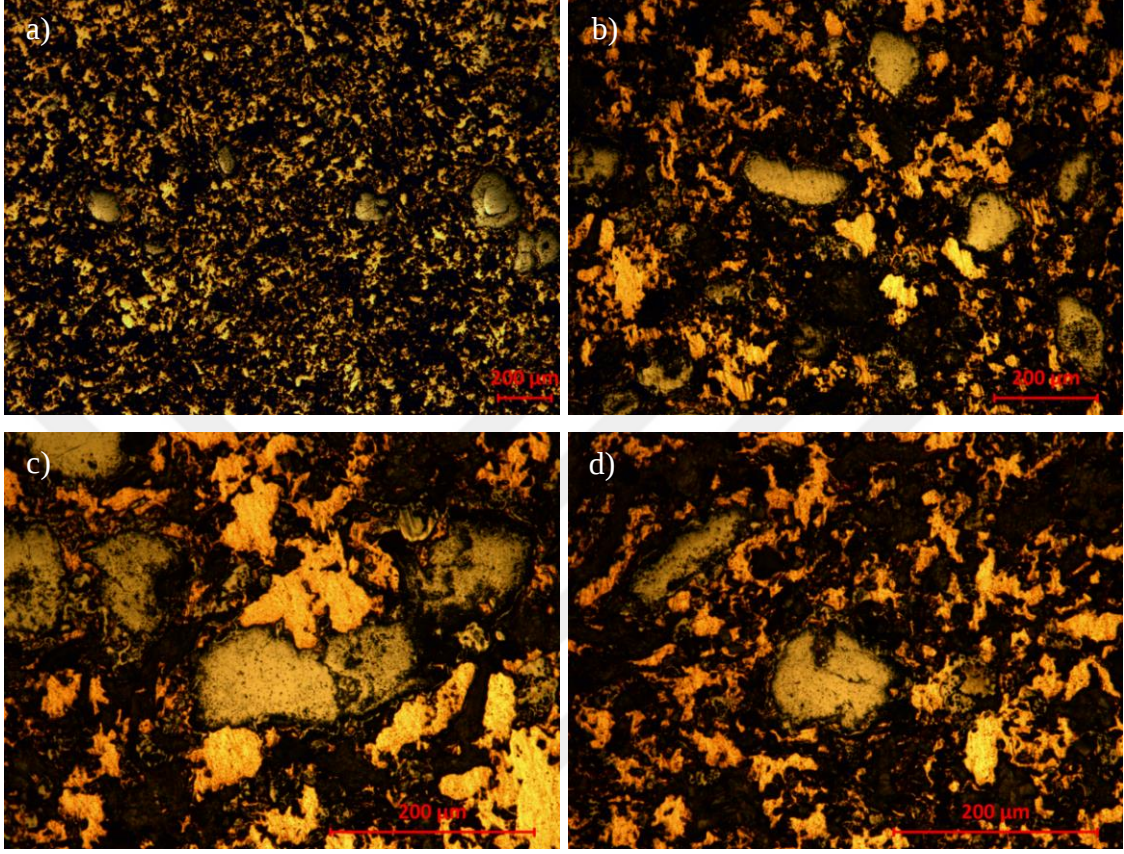
Şekil 5.5. %4 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.

%6 SiC içeren numuneye ait 50X, 100X ve 200X büyütmedeki optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.6'da verilmiştir.



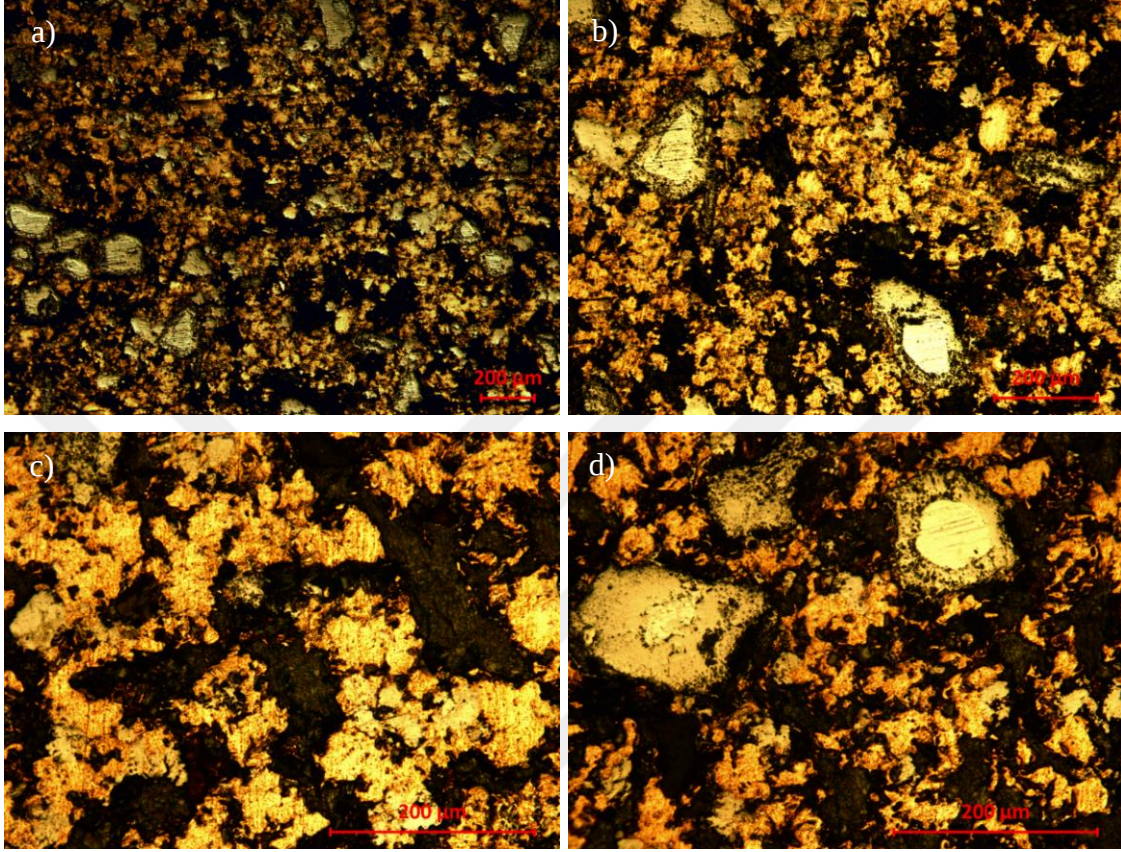
Şekil 5.6. %6 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.

%8 SiC içeren numuneye ait 50X, 100X ve 200X büyütmedeki optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. % 8 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.

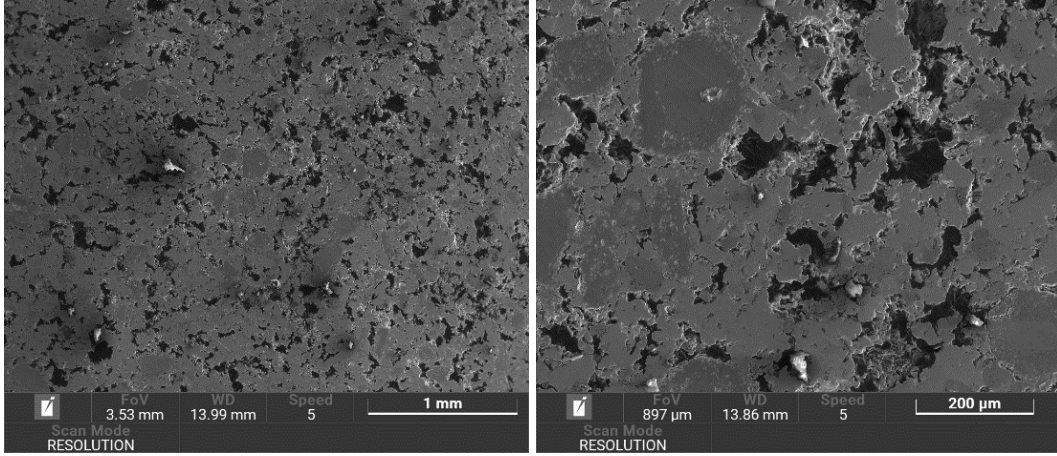
%10 SiC içeren numuneye ait 50X, 100X ve 200X büyütmedeki optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. %10 SiC içeren numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri, a) 50X, b) 100X, c) ve d) 200X.

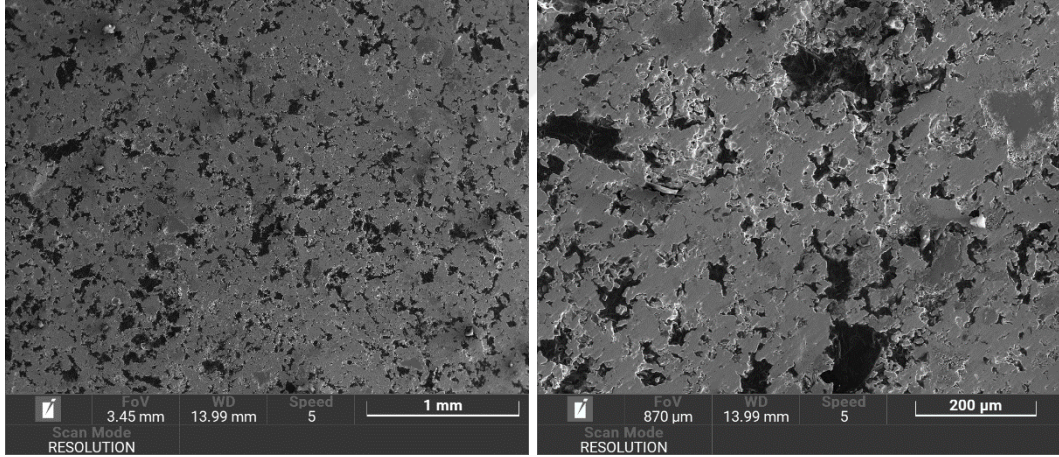
Gerçekleştirilen mikroyapı analizlerinde, bileşim içerisinde katılan bakır, grafit ve aşındırıcı malzemeler net olarak gözlemlenebilmektedir. Mikroyapı içerisindeki yüzey alanı olarak en büyük bölgeyi oluşturan koyu sarı bölgeler bakır matrisi, siyah bölgeler grafiti, koyu gri renge sahip bölgeler ise SiC bileşenlerini göstermektedir. Mikroyapı içerisinde mevcut olarak bulunan 100 µm ve üzeri partikül boyutuna sahip fazların sinterleme esnasında birbiri içerisinde çözünürlüğü yüksek olan bileşenlerin oluşturduğu fazlar olabileceği düşünülmektedir. Bunlara ek olarak balatayı oluşturan malzemelerin, mikroyapı içerisinde homojen bir şekilde dağılım gösterdiği görülebilmektedir. Numunelerin içerisinde bulunan poroziteler, grafit varlığı sebebiyle net bir şekilde ayırt edilememiştir.

%2 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.9’da verilmiştir.



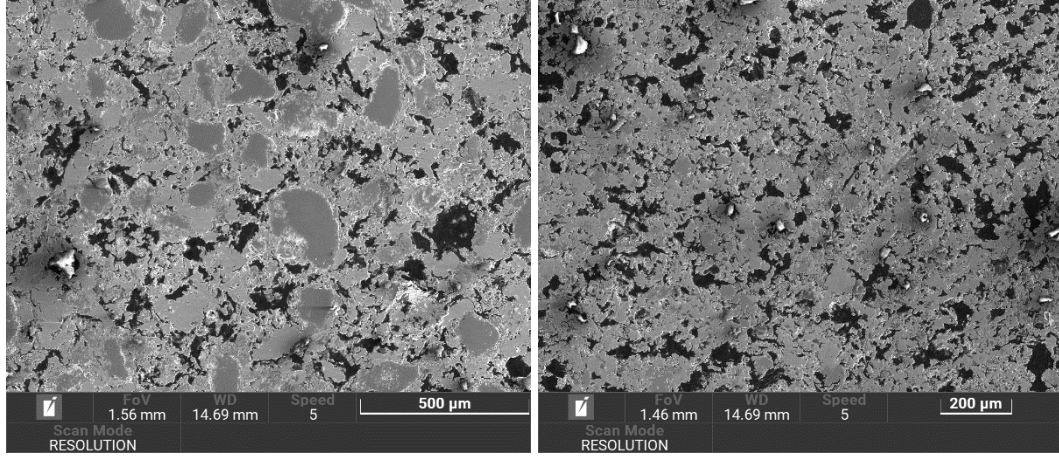
Şekil 5.9. %2 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.

%4 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.10’da verilmiştir.



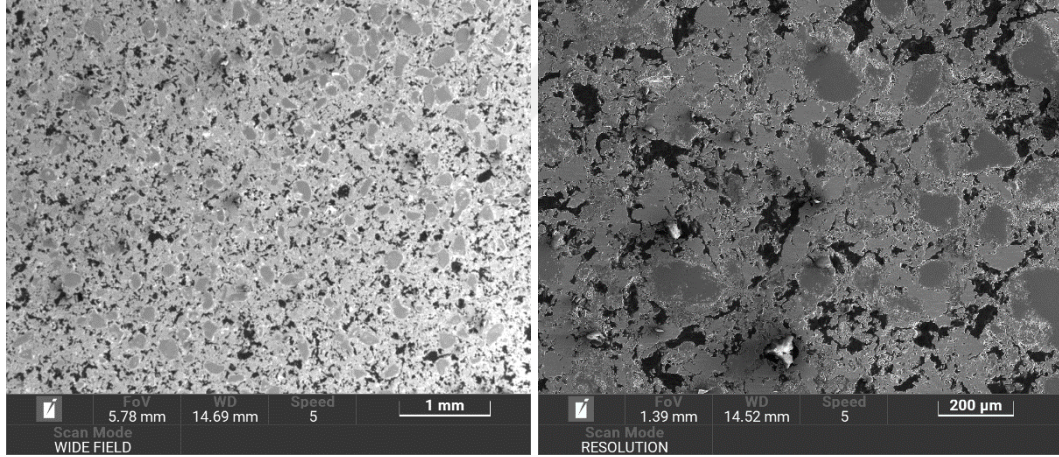
Şekil 5.10. %4 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.

%6 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.11’de verilmiştir.



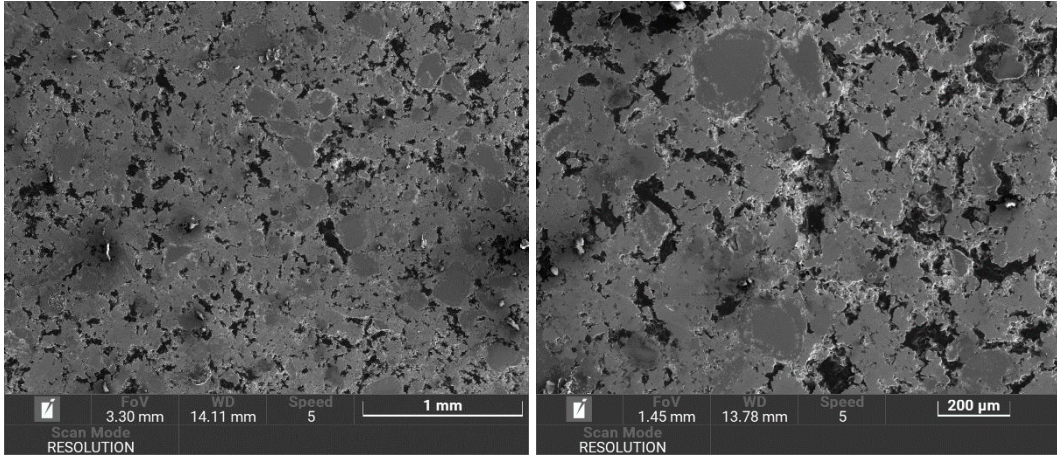
Şekil 5.11. %6 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.

%8 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.12’de verilmiştir.



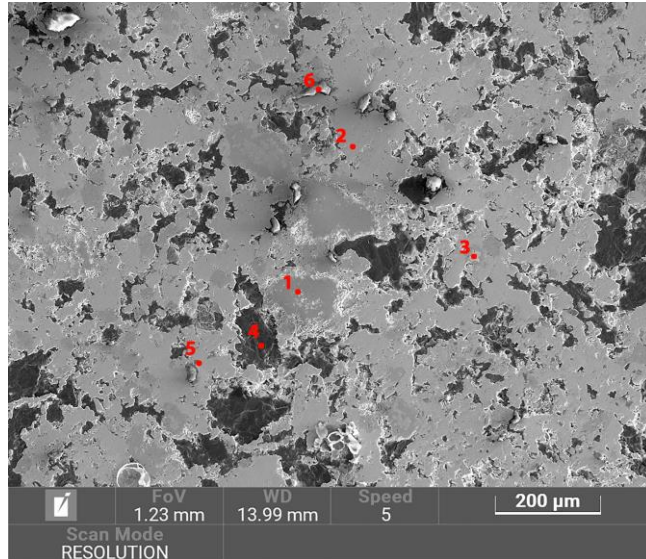
Şekil 5.12. %8 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.

%10 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13. %10 SiC içeren numuneye ait SEM görüntüleri.

Bütün numunelerin içerisindeki bileşenler tür olarak aynı olduğu için yapısal karakterizasyon çalışmalarında EDS analizleri tek bir numune üzerinden gerçekleştirilmiştir. %10 SiC içeren numuneye ait EDS analizlerinin alındığı noktaları gösteren SEM görüntüsü Şekil 5.14’te, noktaların kimyasal bileşimlerini içeren tablo Çizelge 5.3’te verilmiştir.



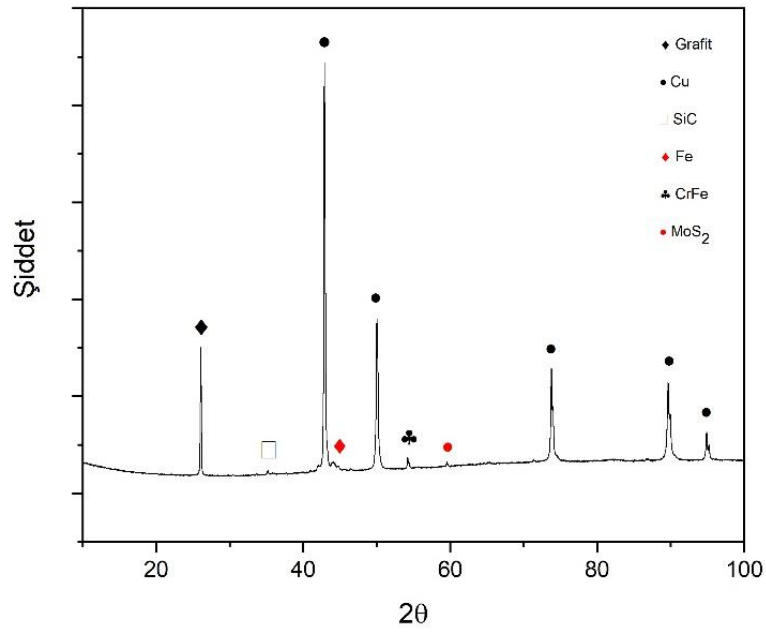
Şekil 5.14. %10 SiC içeren numuneye ait EDS analizlerinin alındığı noktaları gösteren SEM görüntüsü.

Çizelge 5.3. EDS analizlerinin alındığı noktalardaki kimyasal bileşimler.

Nokta	Cu	Fe	Cr	C	Si	O	Mo	S
1		37,05	59,6				2,86	0,49
2	100							
3		100						
4				100				
5				42,97	57,03			
6				11,3	40,26	48,44		

Gerçekleştirilen SEM ve EDS analizleri sonucunda 1 numaralı noktada verilen 100 µm üzerindeki partikül boyutuna sahip bileşenlerin Cr ve Fe elementlerinden oluştuğu ve Fe-Cr fazı olduğu görülmektedir. 2 numaralı noktada verilen fazın, matris fazı olan Cu olduğu gözlemlenmektedir. Bakırın yüksek oranda oksitlenme eğilimine rağmen matris fazı içerisinde Çizelge 5.3'te verilen kimyasal bileşim sonuçlarından da görülebileceği üzere oksijen varlığına rastlanmamıştır. Bu durum sinterleme aşamasında yeterli koruyucu atmosfer ortamının sağlandığını göstermektedir. 3 numaralı noktada verilen fazı mukavemetlendirici malzeme olarak bileşim içerisine katılan Fe fazı oluşturmaktadır. 5 numaralı noktada verilen fazı aşındırıcı malzeme olarak bileşim içerisine katılan SiC fazı oluşturmaktadır. 6 numaralı noktada verilen fazı, Si, C ve O bileşenleri oluşturmaktadır. Bu noktada ise SiC fazının yüksek oksitlenme eğiliminden dolayı sinterleme esnasında oksitlenmiş olabileceği düşünülmektedir.

Numunelerin sinterleme sonrası faz oluşumlarını belirlemek için yapılan XRD analizi sonucunda elde edilen XRD diyagramı Şekil 5.15'te verilmiştir.



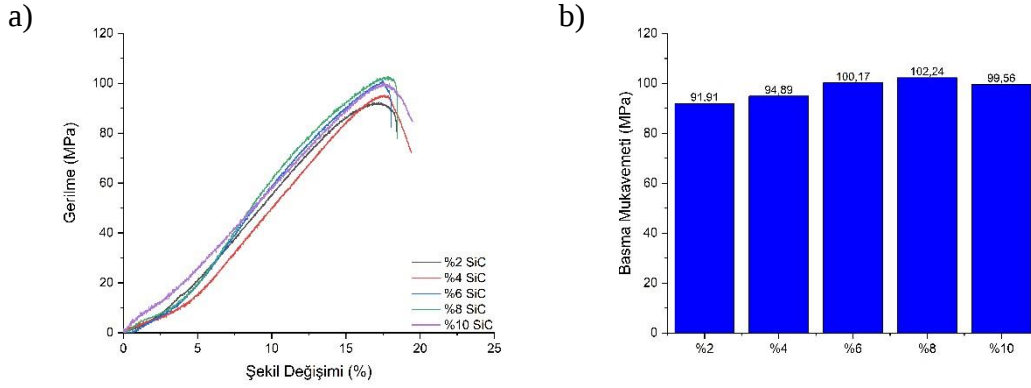
Şekil 5.15. Sinterleme sonrası numunelerde elde edilen bileşenler.

Şekil 5.15 incelendiğinde numunelerin grafit, Cu, SiC, Fe, Fe-Cr ve MoS₂ bileşenlerinden oluştuğu net olarak gözlemlenmiştir ve SEM analizlerinde elde edilen elementel bileşimler doğrulanmıştır.

5.2.2. Mekanik karakterizasyon çalışmaları

Sürtünme elemanları, frenleme esnasında herhangi bir hasar, çatlama, kırılma olmaması için belirli bir mekanik dayanıma sahip olmalıdır. Sürtünme elemanlarının acil frenleme kabiliyetlerinin belirlenmesinde iç kesme mukavemeti ve basma mukavemetlerinin belirlenmesi son derece önemlidir. Bu nedenle farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip numunelerin mekanik karakterizasyon çalışmaları kapsamında iç kesme ve basma mukavemetleri belirlenmiştir.

Numunelerin, basma deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekil değişimi grafiği ve basma mukavemetlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16. Numunelerin basma deneyleri sonucunda elde edilen mukavemet grafikleri, a) gerilme-şekil değişimi grafiği, b) basma mukavemetlerinin karşılaştırılması.

Gerçekleştirilen basma deneyleri sonucunda, en düşük basma mukavemeti %2 SiC içeren numunede 91,91 MPa olarak gözlemlenirken en yüksek basma mukavemeti %8 SiC içeren numunede 102,24 MPa olarak gözlemlenmiştir. %6, %8 ve %10 SiC içeren numunelerin basma mukavemetleri birbirine oldukça yakın değerlerdedir. Ancak %2 ve %4 SiC içeren numunelerin basma mukavemetleri diğer üç numuneye göre düşük kalmaktadır. Yapılan basma deneyleri sonucunda kompozisyon içerisinde artan aşındırıcı miktarının numunelerin basma mukavemetlerini doğrusal bir biçimde olmasa da arttığı gözlemlenmiştir.

İç kesme kuvveti, kesme kuvvetinin kesme alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Numunelerin iç kesme mukavemetleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Numunelerin iç kesme mukavemetleri.

Aşındırıcı İçeriği	%2 SiC	%4 SiC	%6 SiC	%8 SiC	%10 SiC
Kesme Mukavemeti (MPa)	13	13,3	14	14,6	15,2

Yapılan kesme testleri sonucunda, kompozisyon içerisindeki aşındırıcı oranının artmasıyla numunelerin kesme mukavemetinin arttığı görülmektedir. %10 SiC içeriğinde maksimum kesme mukavemeti değeri elde edilmiştir. %2 SiC içeriğinde en düşük kesme

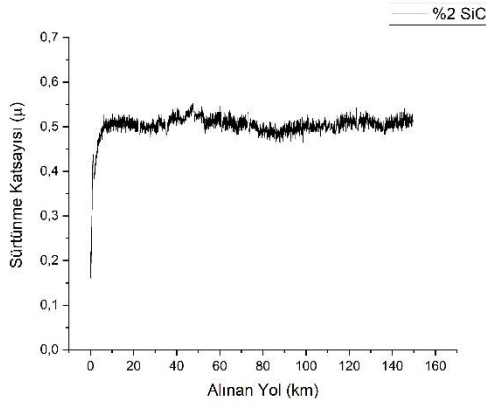
mukavemeti değeri gözlemlenmiştir. Bu durum kompozisyon içerisine katılan SiC bileşenin kesme mukavemetinin matris malzemesi olan bakırın kesme mukavemetinden daha yüksek olmasıyla ve artan SiC oranıyla bakır yüzdesindeki düşüşle ilişkilendirilmiştir.

5.2.3. Tribolojik karakterizasyon çalışmaları

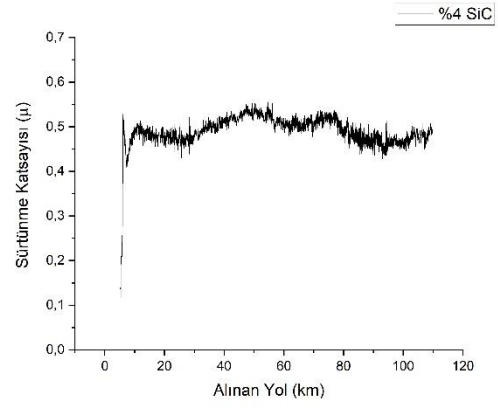
Farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip numunelerin tribolojik karakterizasyon çalışmaları kapsamında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş olup balata numunelerinin aşınma yüzeylerinin SEM ve EDS incelemeleri yapılmıştır.

Aşınma deneyleri, gerçek hızlı tren çalışma koşullarını simüle edecek şekilde 1/400 ölçeğinde küçültülmüş cihazın 3 dakika çalışıp 1 dakika durması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bu duruşun sebebi balatanın sürtünme kaynaklı aşırı ısınmasını engellemektir. Aşınma testleri, numunelerin toplam sürtünme enerjisi 1 MJ olana dek sürdürülmüş olup grafiklerde sürtünme katsayısı-alınan yol cinsinden verilmiştir. Farklı miktarda aşındırıcı malzeme oranına sahip numunelerin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen sürtünme grafikleri Şekil 5.17’de verilmiştir.

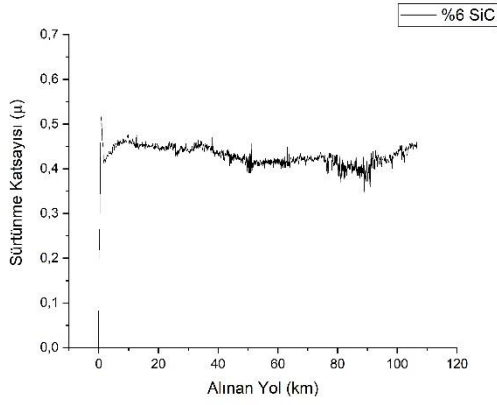
a)



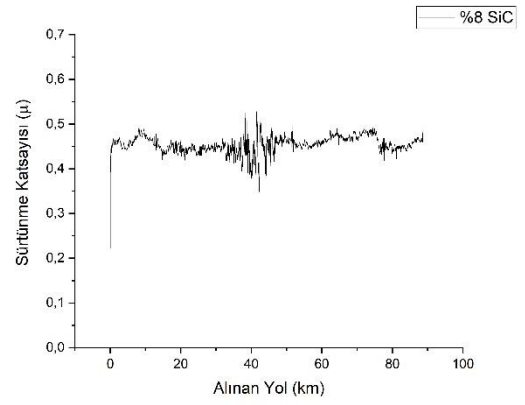
b)



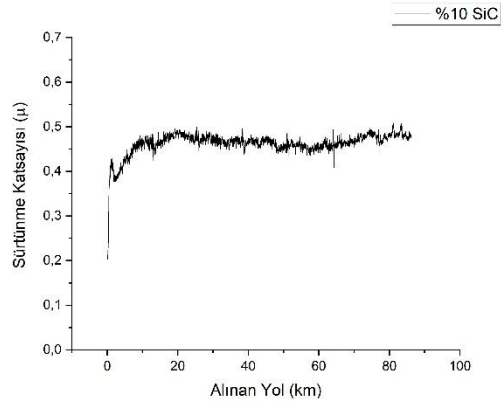
c)



d)

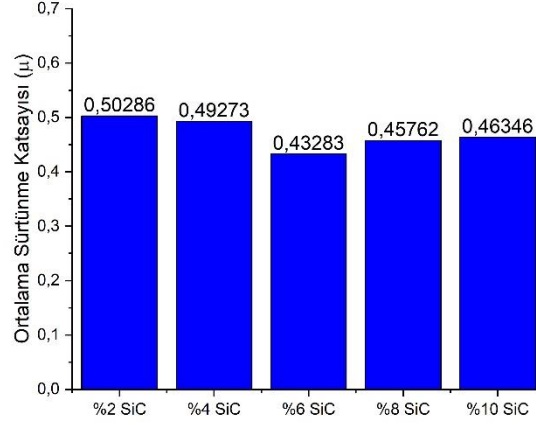


e)



Şekil 5.17. Numunelerin sürtünme katsayısı-alınan yol grafikleri, a) %2 SiC, b) %4 SiC, c) %6 SiC, d) %8 SiC, e) %10 SiC.

Gerçekleştirilen aşınma testleri sonrasında numunelerin ortalama sürtünme katsayıları Şekil 5.18’de verilmiştir.



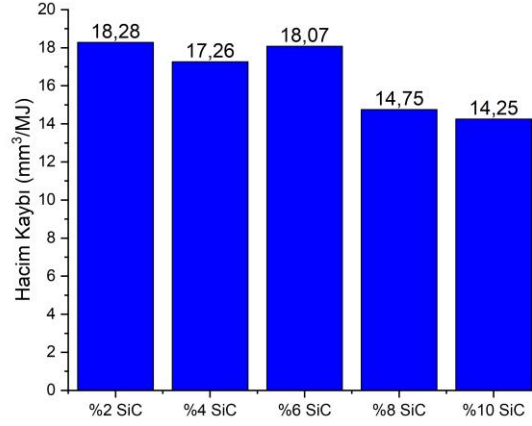
Şekil 5.18. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları.

Numunelerin aşınma deneyleri öncesi ve sonrası ağırlık, uzunluk, çap ve ağırlık kaybı Çizelge 5.5’te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Aşınma testi sonrasında numunelerin fiziksel özelliklerindeki değişim.

Aşındırıcı Miktarı	Numune Çapı (mm)	Test Öncesi Ağırlık (g)	Test Sonrası Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Test Öncesi Uzunluk (mm)	Test Sonrası Uzunluk (mm)
%2 SiC	8,40	2,37	2,32	0,05	8,92	8,59
%4 SiC	8,42	2,43	2,39	0,04	9,37	9,06
%6 SiC	8,35	2,29	2,24	0,05	9,18	8,85
%8 SiC	8,5	2,29	2,20	0,09	8,92	8,66
%10 SiC	8,52	2,38	2,33	0,05	8,85	8,6

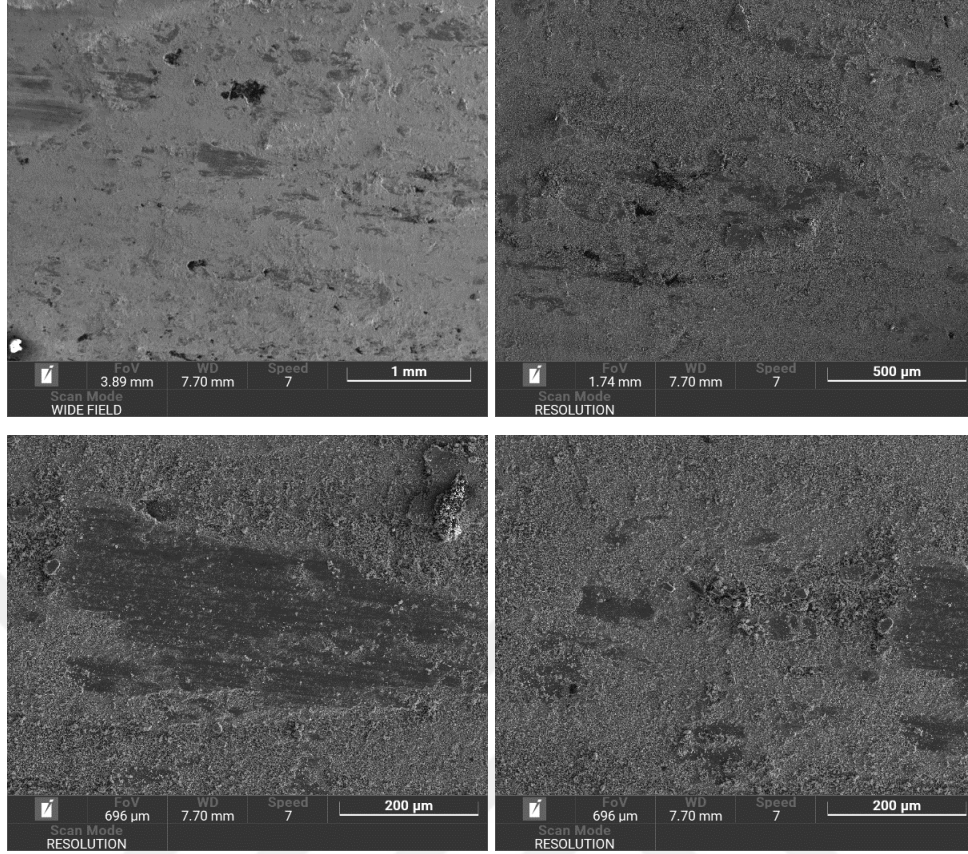
Numunelerde aşınma testi sonrasında meydana gelen hacim kaybı Şekil 5.19’da verilmiştir.



Şekil 5.19. Aşınma testi sonrasında numunelerde meydana gelen hacim kaybı.

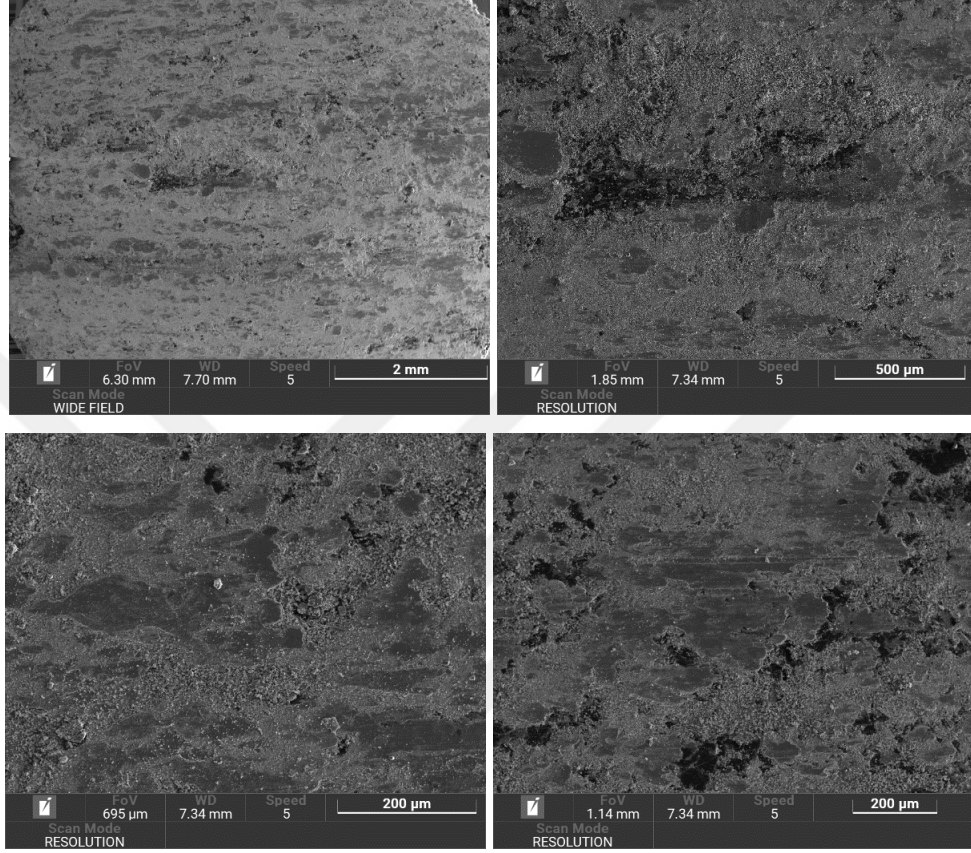
UIC 441-3 standardında yüksek hızlı tren balataları için izin verilen minimum ve maksimum sürtünme katsayısı 0,35-0,50 arasındadır. Yapılan aşınma testleri sonucunda %2 SiC içeren numunenin ortalama sürtünme katsayısının standartların üzerinde olduğu görülmektedir. Diğer numunelerin sürtünme katsayısının standartta belirtilen aralıklar içerisinde olduğu görülmektedir. Ancak %4, %6 ve %8 SiC içeren numunelerin sürtünme katsayısı standartta verilen aralıklar içerisinde kalmış olsa da sürtünme katsayılarında yer yer dalgalanmalar görülmektedir. Bu durum balatalarda güvenli frenleme olması açısından istenmeyen bir durumdur. %10 SiC içeren numunenin sürtünme katsayısı ise standartlara uygun ve stabildir. Aşınma deneyleri sonucunda en fazla hacim kaybı %2 SiC içeren numunede gözlemlenirken en az hacim kaybı %10 SiC içeren numunede gözlemlenmiştir. %6 SiC içeren numunede gerçekleşen hacim kaybı da nispeten yüksektir. Bu durumun stabil olmayan sürtünme katsayısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Aşınma testleri sonrasında numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM ve EDS incelemeleri gerçekleştirilmiştir. %2 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin görüntüleri Şekil 5.20’de verilmiştir.



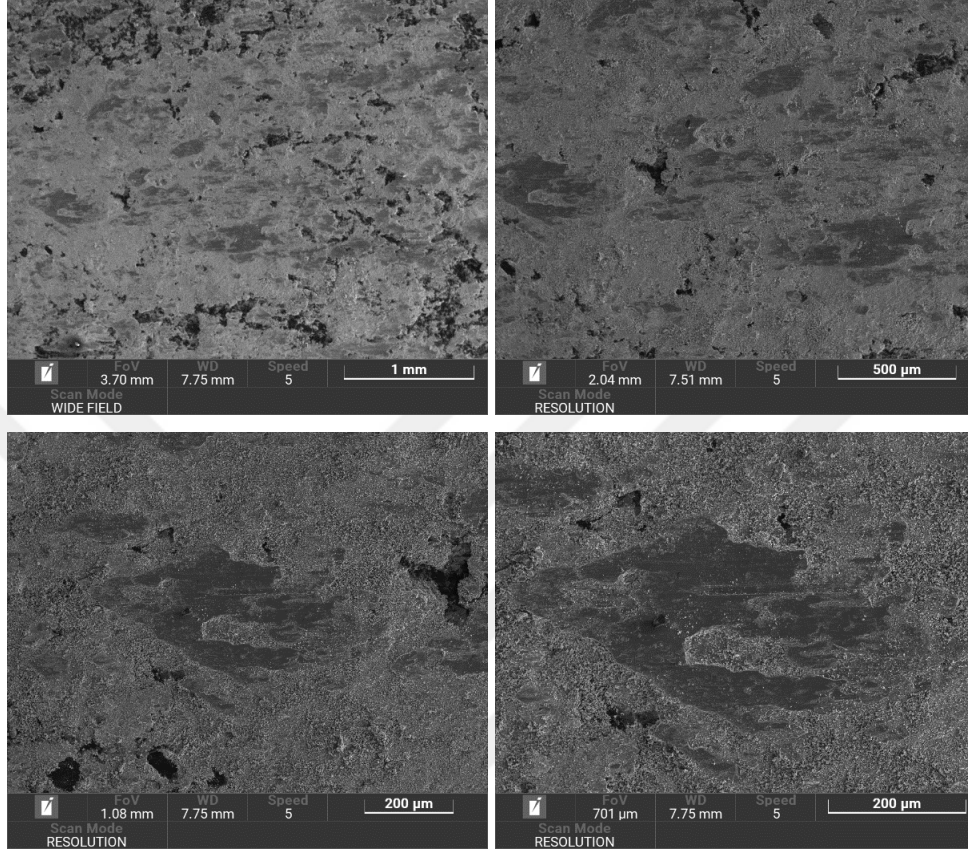
Şekil 5.20. %2 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.

%4 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin görüntüleri Şekil 5.21’de verilmiştir.



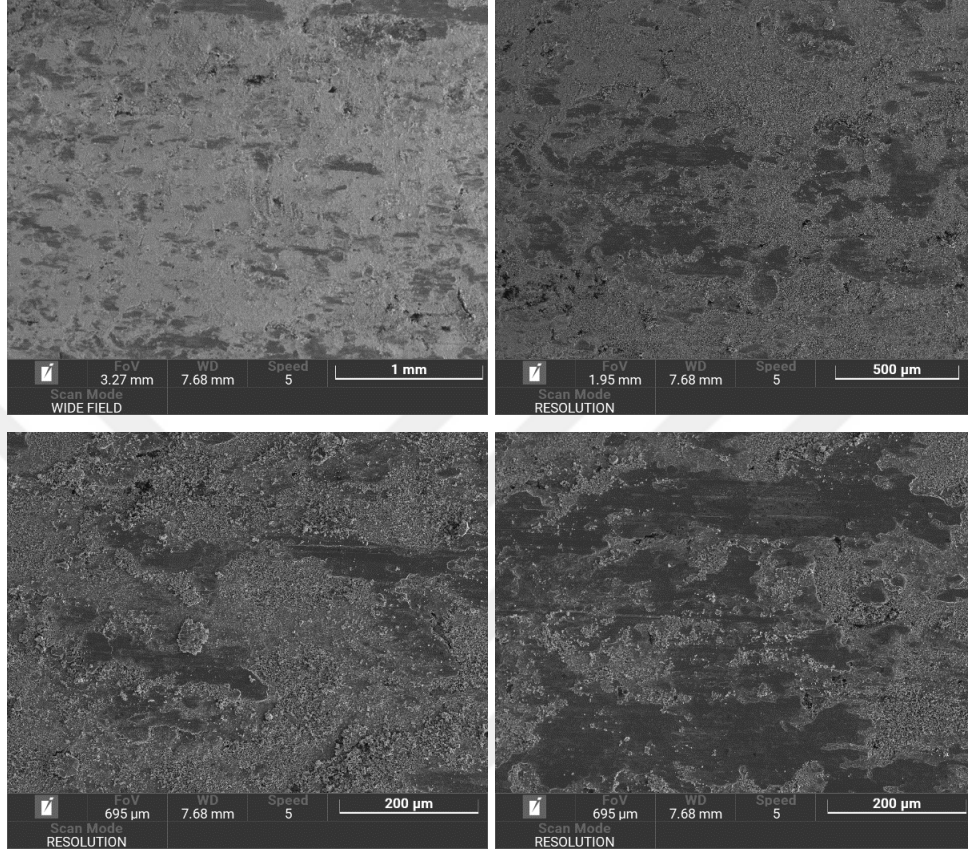
Şekil 5.21. %4 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.

%6 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin görüntüleri Şekil 5.22’de verilmiştir.



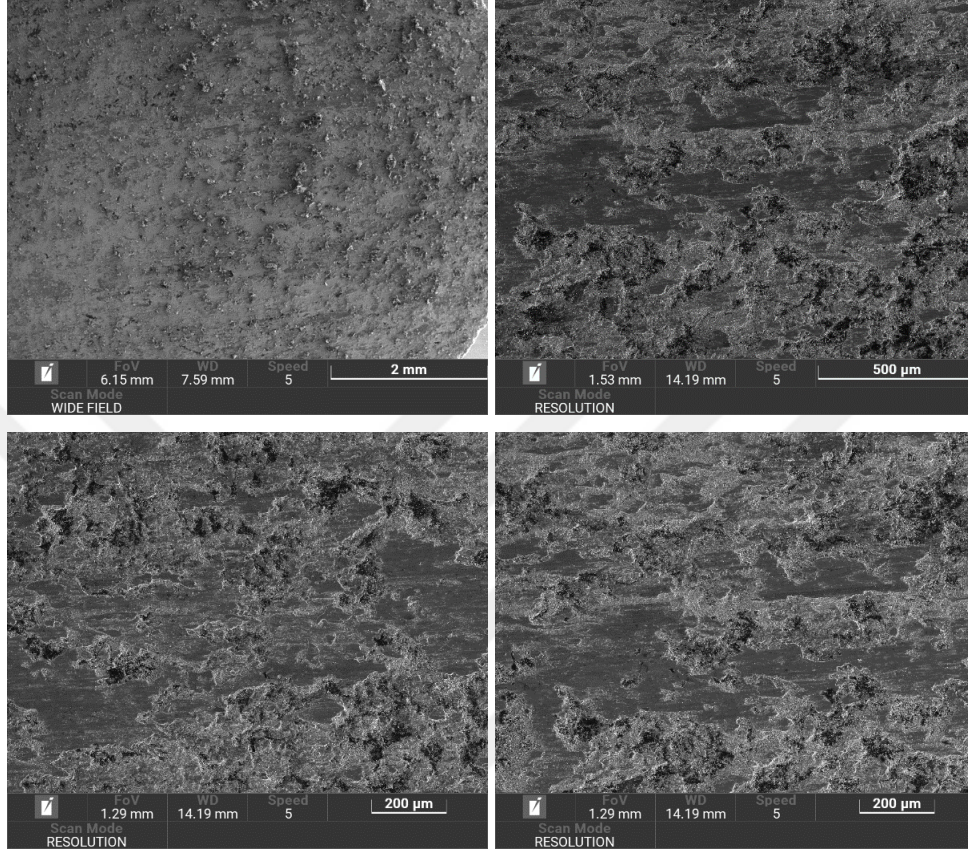
Şekil 5.22. %6 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.

%8 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin görüntüleri Şekil 5.23'te verilmiştir.



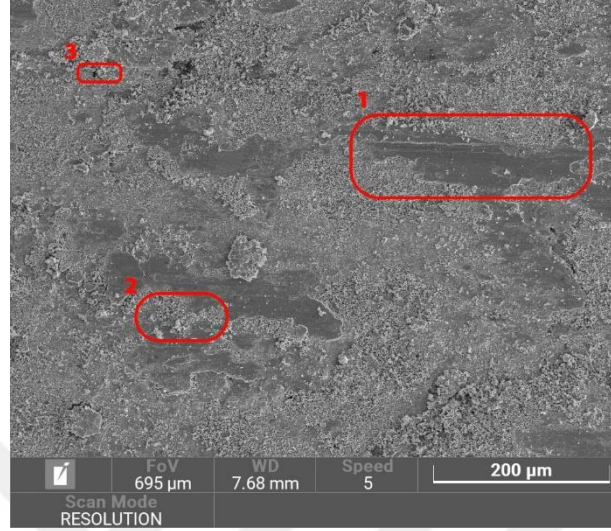
Şekil 5.23. %8 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.

%10 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin görüntüleri Şekil 5.24'te verilmiştir.



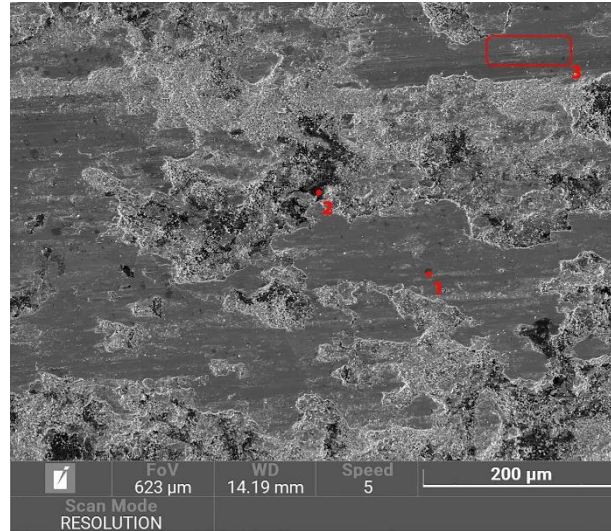
Şekil 5.24. %10 SiC içeren numuneye ait aşınma yüzeylerinin SEM görüntüsü.

Aşınma deneyleri esnasında balata arayüzünde meydana gelen tribolojik yapılara ait görüntü Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.25. Aşınma deneyleri esnasında balatalarda meydana gelen tribolojik yapılar.

Bütün numunelerin içerisindeki bileşenler tür olarak aynı olduğu için aşınma deneyleri sonrasında EDS analizleri tek bir numune üzerinden gerçekleştirilmiştir. EDS analizlerinin alındığı noktaları gösteren görüntü Şekil 5.26'da, seçilen noktalardaki kimyasal bileşimler Çizelge 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.26. EDS analizlerinin alındığı noktaları gösteren SEM görüntüsü.

Çizelge 5.6. Seçilen noktalardaki kimyasal bileşimler.

Nokta	Cu	Fe	Cr	C	Si	O	Mo	S
1				38,92	61,08			
2		2,84		91,24	0,49	5,44		
3	20,99	46,81		8,83		23,37		

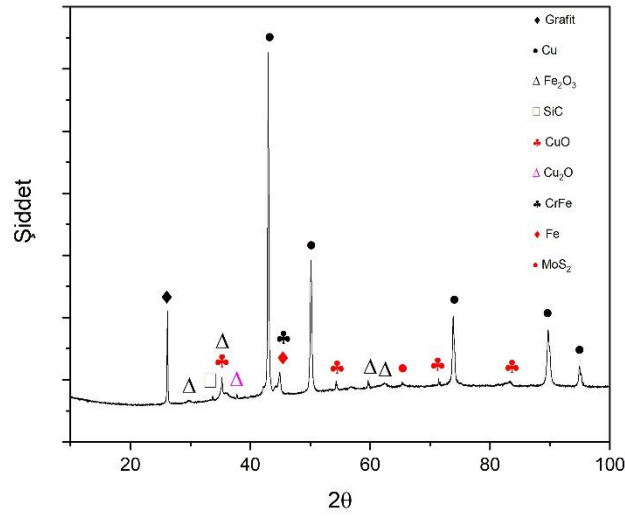
Şekil 5.25 incelendiğinde 1 numaralı bölgede sürtünme filmlerinin oluşumu gözlemlenmiştir. Sürtünme filmleri, aşınma esnasında sürtünme çiftlerinin temas yüzeylerinden kopan partiküllerin, yüksek aşınma direncine sahip olan aşındırıcı partiküller çevresinde birikmesi ile oluşmaktadır. Oluşan sürtünme filmleri, balatanın sürtünme katsayısını dengeleyerek aşınma direncini artırır. Böylelikle fren diskine de daha az hasar verilir. 2 numaralı bölgede sürtünme esnasında kopan, parçalanan partiküllerin balata üzerinde oluşturduğu birikintiler gözlemlenmektedir. Bu birikintiler genellikle sürtünme filmlerinin çevresinde birikmektedir. Sürtünme esnasında bu birikintilerin bir kısmı sürtünme arayüzeyinden atılırken diğer kısmı ezilme, kırılma gibi tekrarlı süreçler sonunda balata yüzeyinde yeni bir sürtünme filmi meydana getirmektedir. 3 numaralı noktada ise sürtünme esnasında yüzeyden parça kopması sonucu meydana gelen mikro boyuttaki boşluklar görülmektedir.

Şekil 5.26 ve Çizelge 5.6’da verilen noktalardaki kimyasal bileşimler incelendiğinde sürtünme filmlerinin üzerinde kompozisyon içerisinde aşındırıcı partikül olarak kullanılan SiC partiküllerinin varlığı gözlemlenmiştir. Bu durum sürtünme filmlerinin, aşındırıcı partiküller çevresinde biriktiğini doğrulamaktadır. 2 numarada verilen noktada grafit fazının varlığı görülmüştür. 3 numaralı bölgede ise sürtünme filmini oluşturan bileşimler görülmektedir. Sürtünme filmi Cu, Fe, C ve O elementlerinden oluşmaktadır. Bu durum sürtünme esnasında Cu, Fe ve C elementlerinin sürtünmenin ve sıcaklığın etkisiyle oksitlenmesi sonucu bileşime O elementinin dahil olduğunu göstermektedir. Balata ve disk arasında hakim olan ana aşınma mekanizmasının, oksidatif aşınma mekanizması olduğu görülmektedir.

Şekil 5.20-5.24 incelendiğinde %2 SiC içeren numunede diğer numunelere kıyasla nispeten daha az sürtünme filmi oluşumu gözlemlenmiştir. %10 SiC içeren numunede ise en fazla sürtünme filmi oluşumu gözlemlenmiştir. Bu durum artan aşındırıcı miktarının

sürtünme filmlerinin oluşumunu desteklediğini göstermektedir. Sürtünme filmleri balataların sürtünme katsayısını dengeleyerek aşınma miktarını azalttığı için %2 SiC içeren numunede aşındırıcı miktarının az olmasına bağlı olarak diğer numunelere göre nispeten daha yüksek sürtünme katsayısı ve hacim kaybı gözlemlenmiştir. %10 SiC içeren numunede bu durum tam tersidir. Son derece kararlı bir sürtünme katsayısı ve minimum hacim kaybı elde edilmiştir.

Aşınma deneyleri sonrasında balata temas arayüzeyinde meydana gelen faz değişimlerinin belirlenmesi için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeye ait XRD diyagramı Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27. Aşınmış yüzeye ait XRD diyagramı.

Şekil 5.27’de verilen aşınmış yüzeye ait XRD diyagramı incelendiğinde sürtünme sonucunda numune içerisinde Fe_2O_3 , CuO , Cu_2O fazlarının meydana geldiği görülmektedir. Sürtünme esnasında disk ve balatanın arayüzey sıcaklığının yükselerek arayüzeyde bir oksidasyon meydana geldiği aşınma sonrası meydana gelen oksit fazlarından görülmektedir. Bununla birlikte Fe ve Fe_2O_3 fazlarının oluşturduğu piklerin miktarındaki artış, sürtünme esnasında Fe elementinin fren diskinden fren balatasının aşınmış yüzeyine transferini doğrulamaktadır.

Yapılan çalışmaların son aşaması olarak farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip balata numunelerinin aşınma testi esnasında fren diski yüzeyinde bıraktığı aşınma izlerinin yüzey profilleri ölçülmüştür. Öncelikle fren diski üzerinde test yapılmamış bir yüzeyden yüzey profili ölçülmüş ve karşılaştırmalar buna göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7’de Ra (aritmetik ortalama), Rz (5 tane yüksek tepe ile 5 tane en alçak noktanın ortalaması) ve Rq (uzunluk boyunca profil düzensizliklerinin ortalaması) türünden verilmiştir.

Çizelge 5.7. Fren diski üzerindeki aşınma izlerinin yüzey profilleri.

Yüzey Ölçüm Parametresi/Numune Kodu	Orijinal Yüzey	%2 SiC	%4 SiC	%6 SiC	%8 SiC	%10 SiC
Ra	0,25	0,39	0,42	0,48	0,5	0,48
Rz	2,8	4,2	3,86	5,77	4,28	4,15
Rq	0,38	0,48	0,53	0,42	0,57	0,58

Çizelge 5.7 incelendiğinde %2 ve %4 SiC içeriğine sahip numunelerin diskte daha az iz bıraktığı görülmektedir. Aşınma deneyleri sonrasında bu numunelerin diğer numunelere kıyasla daha fazla hacim kaybına uğradığı görülmektedir. %6, %8 ve %10 SiC içeriğine sahip numunelerin disk üzerinde bıraktığı izlerin yüzey profilleri hemen hemen aynıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında yüksek hızlı trenlerde kullanılmak üzere bakır matrisli kompozit fren balatalarının optimum üretim parametreleri belirlenmiş, belirlenen optimum üretim parametreleriyle farklı miktarda aşındırıcı oranlarına sahip 5 farklı numune hazırlanarak mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Numune üretiminde farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan sinterleme işlemi sonucunda, 950°C-1,5 saat parametrelerinde en yüksek basma ve kesme dayanımı elde edilirken minimum porozite miktarı da elde edilmiştir.
- Farklı miktarda aşındırıcı oranları kullanılarak üretilen numunelerde yapılan mikroyapı çalışmaları sonucunda elde edilen numunelerin homojen dağılım gösteren bir mikroyapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası numunelerde Grafit, Cu, Fe, Fe-Cr, MoS₂ ve SiC bileşenleri net olarak gözlemlenmiştir.
- Artan aşındırıcı malzeme oranına bağlı olarak numunelerin kesme ve basma mukavemetlerinin arttığı net bir şekilde görülmüştür.
- Aşınma testleri sonucunda %2 SiC içeriğine sahip numunede en yüksek ve uluslararası standartlara uygun olmayan sürtünme katsayısı gözlemlenirken %4, %6 ve %8 SiC içeriğine sahip numunelerde frenleme esnasında istenmeyen ve stabil olmayan sürtünme katsayısı gözlemlenmiştir. %10 SiC içeriğine sahip numunede ise uluslararası standartlara uygun ve stabil bir sürtünme katsayısı gözlemlenmiştir.
- Aşınma testleri sonucunda %2 SiC içeriğine sahip numunede en fazla hacim kaybı görülürken en az hacim kaybı %10 SiC içeriğine sahip numunede görülmüştür. Bu durumun artan aşındırıcı miktarının numuneye mekanik dayanım sağladığı ve sürtünme filmlerinin oluşumunu teşvik ederek sürtünme katsayısının stabilizasyonunu sağladığı ve aşınma miktarını azalttığı görülmektedir.

- Numunelerin aşınma testi sonrasında temas arayüzey görüntüleri incelendiğinde tüm numunelerde sürtünme filminin oluşumu gözlemlenmiştir. Artan aşındırıcı miktarının sürtünme filmi oluşumunu arttığı görülmüştür. %2 SiC içeriğine sahip numunede az miktarda sürtünme filmi oluşumu gözlemlenirken %10 SiC içeriğine sahip numunede en fazla sürtünme filmi oluşumu gözlemlenmiştir. %2 SiC içeriğine sahip numunede sürtünme katsayısının yüksek çıkmasının sebebi ise düşük miktarda film oluşumu ile ilişkilendirilmiştir. Aynı zamanda numunelerde oksidatif aşınma mekanizmasının gerçekleştiği net olarak görülmüştür.
- EDS ve XRD analizleri sonucunda sürtünme esnasında numunelerde sıcaklık ve sürtünme etkisiyle oksidasyon meydana geldiği elde edilen CuO, Cu₂O ve Fe₂O₃ bileşenlerinin varlığıyla doğrulanmıştır.
- Sonuç olarak yüksek hızlı trenlerde kullanıma en uygun sonuçlar %10 SiC içeriğine sahip numunede elde edilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akagündüz, E., 2014, Kompozit Sürtünmeli Fren Balatalarında Yerli Uçucu Kül Katkısının Raylı Taşıt Balata Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi ve Kullanılabilirliğinin Saptanması, Doktora Tezi, YTÜ, 209 s.
- Alojai, H., Benyounis, K., 2016, Advances in Tool wear in Turning Process, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.
- Alpas, A., Bhattacharya, S., Hutchings, I., 2017, Wear of Particulate Metal–Matrix Composites, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.
- Bao, J., Li, Z., Hu, D., Yin, Y., Liu, T., 2015, Frictional Performance and Temperature Rise of a Mining Nonasbestos Brake Material During Emergency Braking, Advances in Materials Science and Engineering.
- Bao, J., Zhu, Z., Tong, M., Yin, Y., Peng, Y., 2012, Influence Of Braking Pressure on Tribological Performance of Non-Asbestos Brake Shoe for Mine Hoister During Emergency Braking, Industrial Lubrication and Tribology.
- Bijwe, J., 1997, Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Review, Composites as Friction Materials.
- Blau, P., 2001, Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, Topical, Oak Ridge National Lab.
- Bocchini, P., 2004, Influence of Controlled Atmospheres on the Proper Sintering of Carbon Steels, Powder Metallurgy Progress.
- Bonfanti. A., 2016, Low-Impact Friction Materials for Brake Pads, PhD Thesis, University of Trento.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Borawski, A., 2016, Suggested Research Method for Testing Selected Tribological Properties Of Friction Components in Vehicle Braking Systems, *Acta Mechanica Et Automatica*.
- Bowden, F., Tabor, D., 2001, *The Friction and Lubrication of Solid*, Oxford University Press.
- Bucur, C., Bucur, A., 2015, Survey of the State of the Art Composites and Sandwich Structures, Technical Series, University of Cluj-Napoca.
- Bhuvaneswari, C., 2010, *Aircraft Brake Pads, A Compendium*.
- Chan, D., Stachowiak, G., 2004, Review Of Automotive Brake Friction Materials, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*.
- Chawla, K., Chawla, N., 2004, *Metal-Matrix Composites*, 1. Material Science and Technology, p. 1–25.
- Delarbre, P., 2019, High Performance Components by Powder Metallurgy, *Advances in Metallurgical and Material Engineering*, s. 29-38.
- Dong, H., 2010, Tribological Properties of Titanium-Based Alloys, *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, p. 58-80.
- Dong, C., 2013, Experimental Investigation on the Fiber Preform Deformation Due to Mold Closure for Composites Processing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 585-591.
- Eriksson, M., Jacobson, S., 2000, Tribological Surfaces of Organic Brake Pads, *Tribology International*, p. 817-827.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ertan, R., Yavuz, N., 2010, Balata Malzemelerinde Kullanılan Yapıların Balatanın Tribolojik Ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi.
- Gigan, G., 2015, On Improvement of Cast Iron Brake Discs for Heavy Vehicles, PhD Thesis, Chalmers University of Technology.
- Godet, M., 1990, Third-Bodies in Tribology, Wear, p. 29-45.
- Gowda, T., Sanjay, M., Bhat, K., Madhu, P., Senthamaraikannan, P., vd., 2018, Polymer Matrix-Natural Fiber Composites: An Overview, Cogent Engineering.
- Gultekin, D., Uysal, M., Aslan, S., Alaf, M., Guler, M., vd., 2010, The Effects of Applied Load on the Coefficient of Friction in Cu-MMC Brake Pad/Al-SiCp MMC Brake Disc System, Wear, p. 73-82.
- Haghshenas M., 2016, Metal–Matrix Composites, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier Publications, p. 1-28.
- İncesu, A., Korkmaz, K., Çetintaş, O., Kubuc, O., Korkmaz, M., vd., Design of Composite Brake Pads for Metro With a Statistical Approach, 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu.
- Jang, G., Cho, K., Park, S., Lee, W., Hong, U., vd., 2010, Tribological Properties of C/C-SiC Composites for Brake Discs, Metals and Materials International, p. 61-66.
- Kato, K., Adachi, K., 2001, Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook.
- Kim, S., Cho, M., Cho, K., Jang, H., 2007, Complementary Effects of Solid Lubricants in The Automotive Brake Lining, Tribology International, p. 15-20.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Krenkel, W., Renz, B., 2002, C/C-SiC Composites for Advanced Friction Systems, Advanced Engineering Materials.
- Kumar, V., Kumaran, S., 2019, Friction Material Composite: Types of Brake Friction Material Formulations and Effects of Various Ingredients on Brake Performance—A Review, Materials Research Express.
- Miller, R., 1997, Thermal Barrier Coatings for Aircraft Engines: History and Directions, Journal of Thermal Spray Technology.
- Mortazavian, S., Fatemi, A., 2015, Fatigue Behavior and Modeling of Short Fiber Reinforced Polymer Composites: A Literature Review, International Journal of Fatigue, p. 297-321.
- Öztürk, B., Arslan, F., Öztürk, S., 2013, Effects of Different Kinds of Fibers on Mechanical and Tribological Properties of Brake Friction Materials, Tribology Transactions.
- Selamat, M., 2005, Friction Materials for Brakes Application, Journal of Industrial Technology, p. 9-25.
- Singh, S., 2015, Analysis of Brake-Pad Friction Material Formulation, International Journal of Advanced Engineering Research and Science.
- Teimourimanesh, S., 2014, Thermal Capacity of Railway Wheels, PhD Thesis, Chalmers University Of Technology.
- Vairan, M., Ramachandran, V., 2005, Mechanical Properties of Glass/Palmyra Fiber Waste Sandwich Composites, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences.
- Verma, P., 2016, Automotive Brake Materials: Characterization of Wear Products and Relevant Mechanisms at High Temperature, PhD Thesis, University of Trento.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Xiang, X., Hong-chao, S., Jie, C., Ping-ping, Y., 2017, Effects of Sintering Pressure and Temperature on Microstructure and Tribological Characteristic of Cu-Based Aircraft Brake Material, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, p. 669-675.
- Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Lu, L., Feng, X., 2016, Review on the Friction and Wear of Brake Materials, Advances in Mechanical Engineering, p. 1-10.
- Xiao, Y., Zhang, Z., Yao, P., Fan, K., Zhou, H., 2018, Mechanical and Tribological Behaviors of Copper Metal Matrix Composites for Brake Pads Used in High-Speed Trains, Tribology International, p. 585-592.
- Xiao, Y., Xiao, S., Chen, J., Zhang, C., 2020, Wear Mechanism of Cu-Based Brake Pad for High-Speed Train Braking at Speed of 380 km/h, Tribology International.
- Xiao-Ming, H., Fei, G., Lin-Lin, S., Rong, F., En, Z., 2016, Effect of Graphite Content on the Tribological Performance of Copper-Matrix Composites Under Different Friction Speeds, Journal of Tribology.
- Xiong, X., Chen, J., Yao, P., Li, S., Huang, B., 2007, Friction and Wear Behaviors and Mechanisms of Fe And SiO₂ In Cu-Based P/M Friction Materials, Wear, p. 1182-1185.
- Yao, P., Xiao, Y., Deng, J., 2011, Study on Space Copper-based Powder Metallurgy Friction Material and Its Tribological Properties, Advanced Materials Research, p. 479-487.
- Yavaş, B., 2014, Monolitik Ve Takviyeli Borkarbür Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme (Sps) Yöntemi İle Üretimi Ve Karakterizasyonu, Yüksek lisans tezi, İTÜ Mühendislik Fakültesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ravichadran, M., Sait, A., Anandakrishnan, V., 2015, Synthesis and Forming Characteristics of Al–TiO₂ Powder Metallurgy Composites During Cold Upsetting Under Plane Stress State Conditions, *Journal of Sandwich Structures and Materials*.
- Zamawiany, A., 2005, Fiber-Reinforced Ceramic Matrix Composites: State of the Art, Challenge And Perspective, *Composites*.
- Zhang, P., Zhang, L., Fu, K., Wu, P., Cao, J., vd., 2019, The Effect Of Al₂O₃ Fiber Additive on Braking Performance of Copper-Based Brake Pads Utilized in High-Speed Railway Train, *Tribology International*, p. 444-456.
- Zhu, Z., Bao, J., Yin, Y., Chen, G., 2012, Frictional Catastrophe Behaviors and Mechanisms of Brake Shoe for Mine Hoisters During Repetitious Emergency Braking, *Industrial Lubrication and Tribology*.
- Walia, M., 2019, Mechanical Braking Systems For Trains, A Study of Temperatures, Fatigue and Wear by Experiments and Simulations, PhD Thesis, Chalmers University of Technology.